

Aus der Poliklinik für Zahnerhaltung und Parodontologie
Ludwig-Maximilians-Universität München
Direktor: Prof. Dr. med. dent. Reinhard Hickel

Exkavation von Dentinkaries mit konventionellen und selbstlimitierenden Verfahren

Dissertation zum Erwerb des Doktorgrades der Zahnheilkunde an der
Medizinischen Fakultät der Ludwig-Maximilians-Universität zu München

vorgelegt von
Lidija Wellisch, geb. Barberic
aus München

2017

Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät der
Universität München

| | |
|-----------------------------|--|
| Berichterstatter: | Prof. Dr. med. dent. Karl-Heinz Kunzelmann |
| Mitberichterstatter: | Prof. Dr. Christof Holberg |
| Tag der mündlichen Prüfung: | 16.11.2017 |

Diese Dissertation wurde mit **L^AT_EX** erstellt.

*Für meinen Mann Rudolf Wellisch
und meine lieben Eltern*

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Einleitung | 1 |
| 2 | Literaturübersicht | 5 |
| 2.1 | Entstehung, Diagnostik und Behandlung von Dentinkaries . | 5 |
| 2.1.1 | Beschaffenheit der Zahnhartsubstanz | 5 |
| 2.1.2 | Entstehung und Folgen von Zahnkaries | 7 |
| 2.1.3 | Verfahren zur Bestimmung von Dentinkaries | 7 |
| 2.1.4 | Behandlung von Dentinkaries | 9 |
| 2.2 | Exkavationsinstrumente | 11 |
| 2.2.1 | Löfflelexkavator | 11 |
| 2.2.2 | Hartmetallbohrer | 11 |
| 2.2.3 | Zirkoniumdioxidbohrer | 12 |
| 2.2.4 | Polymerinstrumente | 12 |
| 2.2.4.1 | Polymerinstrumente der ersten Generation . | 13 |
| 2.2.4.2 | Polymerinstrumente der zweiten Generation | 14 |
| 2.2.4.3 | Anwendung von Polymerinstrumenten | 15 |
| 2.2.5 | Fluorescence-Aided Caries Excavation (FACE) | 15 |
| 2.3 | Chemomechanische und biochemische Präparationsverfahren | 16 |
| 2.3.1 | Chemomechanische Verfahren | 16 |
| 2.3.2 | Biochemische Verfahren | 17 |
| 2.3.2.1 | Auf Pepsin-Basis | 17 |
| 2.3.2.2 | Auf Papain-Basis | 17 |
| 3 | Ziel der Studie | 20 |
| 4 | Material und Methode | 22 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 4.1 | Arbeitsmaterialien | 22 |
| 4.1.1 | Proben | 22 |
| 4.1.2 | Polymerbohrer | 22 |
| 4.1.3 | Hartmetallbohrer | 23 |
| 4.1.4 | Biochemisches Kariestherapieprodukt | 24 |
| 4.1.5 | Chemomechanisches Kariestherapieprodukt | 25 |
| 4.1.6 | Dentinadhäsiv | 25 |
| 4.1.7 | Komposit | 26 |
| 4.2 | Vorgehen | 26 |
| 4.2.1 | Versuch mit dem Lagerschlitten-Bohrsystem | 26 |
| 4.2.1.1 | Einteilung der Gruppen | 28 |
| 4.2.1.2 | Vorbereitung der Proben | 28 |
| 4.2.1.3 | Durchführung des Versuchs | 29 |
| 4.2.2 | Versuch mit dem μ CT | 29 |
| 4.2.2.1 | Einteilung der Gruppen | 30 |
| 4.2.2.2 | Vorbereitung der Proben | 30 |
| 4.2.2.3 | Durchführung des Versuchs | 31 |
| 4.2.3 | Versuch mit dem Rasterelektronenmikroskop (REM) | 32 |
| 4.2.3.1 | Einteilung der Gruppen | 32 |
| 4.2.3.2 | Vorbereitung der Proben | 33 |
| 4.2.3.3 | Durchführung des Versuchs | 34 |
| 4.2.4 | Haftzugversuch | 34 |
| 4.2.4.1 | Einteilung der Gruppen | 35 |
| 4.2.4.2 | Vorbereitung der Proben | 35 |
| 4.2.4.3 | Durchführung des Versuchs | 36 |
| 5 | Ergebnisse | 37 |
| 5.1 | Ergebnisse Lagerschlitten-Versuch | 37 |
| 5.2 | Ergebnisse μ CT -Versuch | 39 |
| 5.2.1 | Volumen des erhaltenen Gewebes | 39 |
| 5.2.2 | Mineralisationsgehalt des erhaltenen Gewebes | 43 |
| 5.3 | Ergebnisse Rasterelektronenmikroskop | 45 |
| 5.3.1 | Dentinkavitäten nach Exkavation mit dem Hartmetallbohrer | 46 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 5.3.2 | Dentinkavitäten nach Exkavation mit dem Polymerbohrer | 47 |
| 5.3.3 | Vergleich der Dentinkavitäten nach Exkavation mit dem Polymerbohrer und dem Hartmetallbohrer | 49 |
| 5.3.4 | Dentinkavitäten nach Exkavation mit dem Polymerbohrer und Biosolv | 50 |
| 5.3.5 | Dentinkavitäten nach Exkavation mit dem Polymerbohrer und Carisolv | 52 |
| 5.3.6 | Vergleich der Dentinkavitäten nach Exkavation mit dem Polymerbohrer und Carisolv sowie mit dem Polymerbohrer und Biosolv | 54 |
| 5.3.7 | Dentinkavitäten nach Exkavation mit dem Polymerbohrer und DBA-Infiltration | 55 |
| 5.3.8 | Dentinkavitäten nach Exkavation mit dem Polymerbohrer und Carisolv sowie DBA-Infiltration | 55 |
| 5.3.9 | Dentinkavitäten nach Exkavation mit dem Polymerbohrer und Biosolv sowie DBA-Infiltration | 57 |
| 5.4 | Ergebnisse Haftzugversuch | 57 |
| 6 | Diskussion | 60 |
| 6.1 | Erläuterungen zu Material und Methode | 60 |
| 6.1.1 | Übergreifende Punkte | 60 |
| 6.1.1.1 | Auswahl der Proben | 60 |
| 6.1.1.2 | Test neuer Methoden | 60 |
| 6.1.2 | Diskussion des Vorgehens beim Lagerschlitten-Versuch | 61 |
| 6.1.2.1 | Einsatz des Lagerschlittens | 62 |
| 6.1.2.2 | Konstruktion des Lagerschlittens | 62 |
| 6.1.2.3 | Vorbereitung der Proben | 64 |
| 6.1.3 | Diskussion des Vorgehens beim μ CT-Versuch | 64 |
| 6.1.4 | Diskussion des Vorgehens beim Rasterelektronenmikroskop-Versuch | 65 |
| 6.1.5 | Diskussion des Vorgehens beim Haftzugversuch | 65 |
| 6.1.5.1 | Prinzip des Mikrozugversuchs | 65 |
| 6.1.5.2 | Vorbereitung der Proben | 65 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 6.2 | Diskussion der Ergebnisse | 66 |
| 6.2.1 | Diskussion der Ergebnisse des Lagerschlitten-Versuchs | 67 |
| 6.2.2 | Diskussion der Ergebnisse des μ CT -Versuchs | 68 |
| 6.2.3 | Diskussion der Ergebnisse des Rasterelektronenmikroskop -Versuchs | 69 |
| 6.2.4 | Diskussion der Ergebnisse Haftzugversuch | 70 |
| 7 | Zusammenfassung | 73 |
| 8 | Anhang | 89 |
| 9 | Danksagung | 94 |

Kapitel 1

Einleitung

Die Kariesforschung arbeitet derzeit verstärkt daran, schonendere Methoden für die Behandlung von Dentinkaries bereitzustellen. Ziel ist es, die Zahnhartsubstanz möglichst weitgehend zu erhalten, insbesondere auch eine Perforation der Pulpa zu verhindern und somit zur nachhaltigen Zahnversorgung beizutragen.

Im klassischen Ansatz wird Dentinkaries mithilfe eines Hartmetallbohrers exkaviert. Hauptgrund für das invasive Vorgehen ist dabei, dass man die bakterielle Belastung reduzieren möchte (Fusayama, 1997). Allerdings haben Studien gezeigt, dass die Exkavation keine sterilen Bedingungen hinterlässt: Selbst bei vollständiger Entfernung des weichen kariösen Dentins bleiben Mikroorganismen zurück (Kidd, 2004; Kunzelmann, 2011).

Der große Nachteil des klassischen Ansatzes liegt im Risiko der Überexkavation. Der Zahnarzt muss den therapeutischen Endpunkt selbst bestimmen, der beim Übergang von der kariösen zur gesunden Zahnschubstanz liegen sollte. Als Anhaltspunkt dient dabei die Härte des Gewebes: Um sie zu beurteilen, wird die Kavität taktil – etwa mit einer Sonde – überprüft. Über das Ausmaß der Exkavation entscheiden also das subjektive Empfinden des Behandlers und der jeweilige Ausbildungsstandard. Häufig wird dabei mehr exkaviert als nötig; es kommt zum Verlust gesunder Zahnhartsubstanz (Dammachke et al., 2008; Celiberti et al.,

2006). Im anderen Extrem kann es gelegentlich auch vorkommen, dass versehentlich infiziertes bzw. als entfernungswürdig eingestuftes Gewebe belassen wird (Willmott et al., 2007).

Seit einigen Jahren zeichnet sich nun ein Trend zu schonenderen Verfahren ab (Alves et al., 2010; Bjørndal et al., 2010; Casagrande et al., 2009; Lula et al., 2009; Ricketts et al., 2006). Ziel ist es, gesundes Dentin zu erhalten und möglichst nur kariöses Dentin zu entfernen (Fusayama, 1979). Ausgangspunkt ist die Überlegung, dass auch kariös verändertes Dentin unter bestimmten Umständen remineralisiert werden kann: Konkret ist dies so lange möglich, solange das Hydroxylapatit, welches die Kollagenfasern des Dentins umhüllt, durch die von Bakterien produzierten Säuren nicht vollständig aufgelöst wurde (Ahmed et al., 2008). Ein sinnvoller Behandlungsendpunkt wäre somit der Übergang zwischen demineralisiertem Dentin und denaturiertem Kollagen (Kunzelmann, 2011). Um nun objektive Kriterien für den Einsatz schonender Behandlungsmethoden sowie das Ausmaß der Exkavation zu ermitteln, werden in zahlreichen Studien rotierende Instrumente (wie v.a. Metallbohrer) und nicht-rotierende Exkavationsmethoden (Handinstrumente, Air Abrasion, Ultraschall-Instrumentierung, chemomechanische Methoden und Lasertechniken) analysiert und ihre Vor- und Nachteile verglichen. Weniger Beachtung finden bislang die rotierenden Polymerinstrumente (Polymerbohrer), die erst seit wenigen Jahren auf dem Markt sind.

Ein jüngeres Beispiel für schonendere Exkavationsverfahren sind die sogenannten selbstlimitierenden Methoden (Kunzelmann, 2005): Es handelt sich dabei um Exkavationsverfahren, in denen der therapeutische Endpunkt anhand der Beschaffenheit des Dentins objektiv bestimmt wird. Sie werden zur Anwendung im kariös infizierten, Pulpa-nahen Dentin empfohlen, da hier noch remineralisierbare Strukturen vorhanden sein könnten. Die Schichtstärke des pulpanahen Dentins kann über eine Pulpaeröffnung entscheiden.

Bei den selbstlimitierenden Methoden unterscheidet man zwischen solchen mit aktivem und mit passivem Feedbacksystem: Aktiv bedeutet, dass der Zahnarzt selbst den Endpunkt einer Exkavation anhand bestimmter Parameter bestimmt; passiv heißt, dass der Endpunkt der Exkavation in die Methode integriert ist. (Tab. 1.1):

Aktives Feedback

(= Schwellenwert einstellbar)

- Fluoreszenz-Feedback (Fluorescence-Aided Caries Excavation = FACE)
- Drehmoment-kontrollierter Bohrer
- Fluoreszenzgesteuerte Laser

Passives Feedback

(= Schwellenwert nicht variierbar, intrinsisch festgelegt)

- Chemomechanische Verfahren (Carisolv)
- Proteolytische Enzyme (z.B. Pepsin, Trypsin, Kollagenase, Papain (Handelsname Papacaire))
- Rotierende Polymerinstrumente (Smartburs 2, Polybur Pl)

Tabelle 1.1:

Übersicht über selbstlimitierende Kariesexkavationsmethoden (Kunzelmann, 2005).

Zu den selbstlimitierenden Methoden mit passivem Feedbacksystem gehört auch der Polymerbohrer: Da seine Härte etwas geringer ist als die von gesundem Dentin, beendet er die Exkavation bei Erreichen des härteren Gewebes von alleine. Weitere Ansätze mit Passiv-Feedback sind biochemische Therapien, etwa proteolytische Enzyme, sowie chemomechanische Verfahren (Kunzelmann, 2011).

Die hier beschriebene In-Vitro-Studie befasst sich eingehender mit den selbstlimitierenden Methoden mit passivem Feedbacksystem. Die Studie ging von der Hypothese aus, dass diese Methoden geeignet sind, demineralisiertes Dentin weitgehend selektiv zu entfernen, und somit bei der Therapie der Dentinkaries eine ernsthafte Alternative zum Hartmetall-

bohrer bieten. Dies war in einer Reihe von Versuchen zu prüfen und zu dokumentieren. Vor der detaillierteren Erläuterung der Studie gibt das folgende Kapitel "Literaturübersicht" zunächst einen groben Überblick über den bisherigen Stand der Forschungen.

Kapitel 2

Literaturübersicht

Im Rahmen der Literaturübersicht gilt es, den aktuellen (in der Literatur dokumentierten) Wissensstand zu den hier abgedeckten Themen zusammenzufassen: Nach einer Übersicht über die Entstehung, Bestimmung und Behandlung von Dentinkaries werden die derzeit zur Verfügung stehenden Präparationsverfahren vorgestellt.

2.1 Entstehung, Diagnostik und Behandlung von Dentinkaries

2.1.1 Beschaffenheit der Zahnhartsubstanz

Der menschliche Zahn besteht zum größten Teil aus Hartsubstanz. Davon wiederum ist die Hauptmasse das Dentin, das im Bereich der Krone von Schmelz und im Bereich der Wurzel von Zement überzogen ist. Das Dentin umschließt das Pulpencavum – einen Hohlraum, in dem sich die Zahnpulpa befindet (Hellwig, 2005).

Der Zahnschmelz besteht zu 96-97% aus anorganischem Apatit. Die Apatitkristalle liegen in einer Mischform aus Hydroxylapatit [$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$], Fluorapatit und Carbonapatit vor. Mit seiner Knoop-Härte (KNH) von 343 (Hellwig, 2005) schützt der Zahnschmelz den Zahn bzw. das Dentin im

Bereich der Zahnkrone vor physikalischen, chemischen und biologischen Einflüssen aus der Mundhöhle. Zahnschmelz kann nach Fertigstellung der Zahnkrone nicht nachgebildet werden (Radlanski, 2011). Das Zementum, das den Zahn im zervikalen Bereich schützen soll, ist nur $130\mu\text{m}$ dick (Zander and Hürzeler, 1958). Somit ist das Dentin hier einem besonders hohen Risiko ausgesetzt: Es kann durch kariösen Befall am zervikalen Zementum – begünstigt durch schlechte Mundhygiene – geschädigt werden.

Das Dentin ist mit einer Knoop-Härte von nur 70 deutlich weicher als der Zahnschmelz. Zu 70 Gew.% besteht es ebenfalls wie dieser aus anorganischem Apatit. Darüber hinaus wird es von Odontoblastenfortsätzen durchzogen: Als Odontoblasten bezeichnet man die Pulpazellen, die den Pulpahohlraum auskleiden und Dentin bilden können; ihre Zellfortsätze sind folglich als fester Bestandteil der Zahnpulpa zu sehen (Heide-mann, 2001). Odontoblastenfortsätze verlaufen in sogenannten Dentintubuli oder Kanälchen, die sich in leicht geschwungenem Verlauf senkrecht von der Dentin-Pulpa-Grenze durch das Dentin bis zur Schmelz-Dentin-Grenze ziehen, wo sie sich verzweigen. Pulpanah liegt ihre Anzahl bei etwa $45000/\text{mm}^2$, pulpafern nur noch bei rund $15000/\text{mm}^2$. Der Durchmesser der Tubuli beträgt etwa $2\mu\text{m}$ und nimmt zur Schmelz-Dentin-Grenze hin ebenfalls ab (Hellwig, 2005).

Entwicklungsgeschichtlich, biologisch und strukturell bilden die Pulpa und das umgebende Dentin eine Einheit; man spricht von der Pulpa-Dentin-Einheit. Charakteristisch für sie ist, dass die Odontoblastenfortsätze auch nach Abschluss der Zahnbildung immer wieder neues Dentin erzeugen können. Im Lauf der Zeit führt dies zu einer Verkleinerung der Pulpahöhle (Radlanski, 2011). Allerdings werden die Fortsätze bei jedem Kontakt mit dem zahnärztlichen Bohrer geschädigt, wenn nicht sogar zerstört, so dass letztendlich eine endodontische Behandlung erforderlich werden kann.

2.1.2 Entstehung und Folgen von Zahnkaries

Die Zahnkaries ist die häufigste Erkrankung der Zahnhartsubstanz. Wie andere infektiöse Erkrankungen kann sie auch die drei Phasen Stagnation, Remission und Progression durchlaufen (Hellwig, 1999). Man unterscheidet zwischen initialer Schmelzkaries und Kavitationen in Dentin und Pulpa. Werden keine Gegenmaßnahmen ergriffen, kann die Erkrankung zum irreversiblen Verlust der Zahnhartsubstanz führen; in schweren Fällen kann sie auch Zahnhals und wurzeln, Zahnfleisch, Bändern und sogar Knochen befallen. Entsprechend reichen die Symptome von reinweißen oder braunen Flecken an der Zahnoberfläche über starke Schmerzen bis hin zum Abszess und Zahnausfall. Verantwortlich für die Entstehung der Zahnkaries ist ein Zusammenwirken pathogener Mikroorganismen und Umweltfaktoren. Beim gesunden Gebiss befinden sich De- und Remineralisation im Gleichgewicht. Eine häufige Zufuhr fermentierbarer Kohlenhydrate aber kann ein saures Milieu schaffen und den pH-Wert der Mundflora so weit absenken, dass das Wachstum säureproduzierender und säuretolanter Keime wie *Streptococcus mutans* und Laktobazillen gefördert wird. Als Folge wird die Plaque kariogen; d.h. ihre Azidogenität bleibt erhöht oder steigt weiter, was die Demineralisation des Zahnhartgewebes und damit seine irreversible Schädigung bewirkt (Kneist, 2004). Die Bakterien lösen den mineralischen Anteil des Gewebes auf und schädigen die Kollagenmatrix so stark, dass eine Remineralisierung unmöglich wird.

Kariogene Mikroorganismen können auch gesunde Zähne besiedeln. Frühere Hypothesen, nach denen die Zahnkaries das Vorhandensein von Plaque voraussetze, mussten insofern revidiert werden.

2.1.3 Verfahren zur Bestimmung von Dentinkaries

Zur Diagnose von Dentinkaries diente anfangs die Mikroradiographie, eine analoge Röntgentechnik zur Bestimmung feiner Strukturen, die 1963 entwickelt wurde (Angmar et al., 1963). Anhand der mikroradiographi-

schen Aufnahmen, die auf einem Film festgehalten werden, versucht man, den Mineralisationsgehalt der Karies zu bestimmen: Hoch mineralisiertes, gesundes Gewebe wird dabei hell dargestellt, während ein verminderter Mineralisationsgehalt das Gewebe dunkler erscheinen lässt. Limitation des Verfahrens bestehen in der Zweidimensionalität: Hintereinander liegende Gewebsstrukturen überlappen auf dem Bild und sind somit nicht zu differenzieren – das Verfahren gibt also keinen Aufschluss auf die Tiefe einer Läsion.

In den 70er Jahren entwickelte der englische Ingenieur G. N. Hounsfield die Computertomographie – ein Verfahren zum dreidimensionalen Röntgen (Rack, 2007). Der zu untersuchende Körperteil wird in einer Röhre mit Röntgenstrahlern und Empfangsdetektoren platziert. Unter schneller Rotation der Röhre erzeugt man verschiedene Schnittbilder von jeder Ebene; aus den Einzelaufnahmen errechnet der Computer dann ein exaktes Schnittbild. Gegenüber dem konventionellen Röntgenverfahren bietet die Computertomographie diverse Vorteile: Die Abbildungen sind scharf, Strukturen lassen sich örtlich genau einordnen, die Diagnose kann exakter gestellt werden. Als Limitationen sind zu nennen, dass nur eine Ortsauflösung im Mikrometerbereich erreicht werden kann und Weichgewebe nach wie vor nur eingeschränkt sichtbar sind (Rack, 2007). In einer nächsten Stufe wurde daher die Mikrocomputertomographie (μ CT) entwickelt. Die Geräte sind hier kleiner und bieten eine stark erhöhte Auflösung, vergleichbar mit einer dreidimensionalen Mikroskopie. Neben der quantitativen Analyse von Geweben anhand des Absorptionskontrastes lassen sich mit diesem Verfahren mittels Synchrotronstrahlung auch Phasenkontrastmessungen durchführen, die zur Erkennung von Weichgewebe dienen. Somit erlaubt es diese Technik, zwischen stark entmineralisiertem Dentin, Schichten mit zunehmender Mineralisierung und gesundem Dentin zu differenzieren (Clementino-Luedemann et al., 2006). Da diese Geräte sehr klein sind, eignen sie sich für die In-Vitro-Kariesdiagnostik besonders gut.

2.1.4 Behandlung von Dentinkaries

Ist das kariöse Dentins aufgrund zerstörter Kollagenstrukturen nicht mehr remineralisierbar, muss sie beim Exkavieren komplett entfernt werden. In der tiefer liegenden Zone finden sich meist weniger Bakterien. Zwar kommt es auch hier zur Auflösung des Mineralanteils, doch bleibt dabei die Ultrastruktur der Kollagenmatrix unverändert (Damaschke, 2005). (In Anlehnung an Fusayama liegt hier also lediglich *affected dentin* vor, im Unterschied zum *infected dentin* – (Fusayama, 1979).) Folglich muss die innere Schicht des kariösen Dentins nicht zwingend entfernt werden, da sie nach Entfernung der Bakterien und ihrer metabolischen Produkte remineralisiert werden kann (Fusayama, 1982; Ohgushi, 1973).

Auch Kidd spricht sich dafür aus, dass nicht notwendigerweise bis ins harte Dentin exkaviert werden muss: Voraussetzung sei, dass der Biofilm dauerhaft entfernt und neue Bakterien durch eine dentinadhäsive Restauration von ihrem Substratnachschieb ferngehalten würden (Kidd, 2004; Tsolmon, 2008; Kunzelmann, 2011). Dazu stellt Mertz-Fairhurst zwar fest, dass sich Kavitäten nicht sicher randdicht verschließen ließen (Mertz-Fairhurst et al., 1998; Kunzelmann, 2011); jedoch weiß man aus Studien und Übersichtsartikeln sowie einer Metaanalyse der Cochrane Collaboration, dass eine minimal-invasive oder eine schrittweise Kariesexkavation ebenso sicher sind wie die konventionelle, invasivere Kariesentfernung (Kunzelmann, 2005). Dafür sprechen auch Forschungen, laut denen weiches Dentin unter einer dichten Füllung trockener und härter wird und somit remineralisiert werden kann (Kunzelmann, 2011; Kidd, 2004; Alves et al., 2010; Bjørndal et al., 2010; Casagrande et al., 2009; Lula et al., 2009; Ricketts et al., 2006). Dabei sieht Ahmed als Voraussetzung für die Remineralisierung, dass im Dentin Hydroxylapatit-Kristallisationskeime vorhanden seien (Ahmed et al., 2008; Bertassoni, 2011). Dies wiederum ist bei intaktem (nicht denaturiertem) Kollagen der Fall.

In der Regel strebt man heute an, demineralisiertes Dentin zu erhalten und nur das weiche Dentin mit denaturiertem Kollagen zu entfernen. Problematisch ist dabei, dass beide Bereiche aufgrund von Diffusionsprozessen

sen nicht klar abgrenzbar sind. Vielmehr nimmt die Bakteriendichte von der Läsion in Richtung unverändertes Dentin allmählich ab, während der Mineralisationsgrad und die Härte der Zahnschubstanz gleichzeitig zunehmen (Kunzelmann, 2011; Ogawa et al., 1983; Kunzelmann, 2011).

Wie viel Dentin also im Rahmen der invasiven Therapie mechanisch entfernt wird, liegt im Ermessen des Behandlers (Kunzelmann, 2011; Tsolmon, 2008). Derzeit sieht die verbreitete Praxis meist so aus, dass der Behandler die Härte der exkavierten Kavität mittels einer Sonde auf überprüft: Fühlt sich das Gewebe hart an, wurde ausreichend kariöses Dentin entfernt. Man geht also derzeit davon aus, dass das gesunde und erhaltungswürdige Dentin dort beginnt, wo sich das Gewebe so hart anfühlt, dass es mit der Stahlsonde nicht mehr eingeritzt werden kann.

2.2 Exkavationsinstrumente

2.2.1 Löfflexkavator

Der Löfflexkavator ist ein Handinstrument zur Entfernung von Dentinkaries. Der therapeutische Endpunkt hängt dabei vom Behandler und dessen Kraftapplikation auf das Instrument ab. Nachteile der Technik sind ein zu hoher Kraftaufwand und die als Folge mögliche Überpräparation der Karies insbesondere in pulpanahen Dentinanteilen, weshalb der Exkavator nur in pulpafernen Anteilen angewendet werden sollte (Kunzelmann, 2011).

2.2.2 Hartmetallbohrer

Der Rosenbohrer gilt als konventionelles Werkzeug zur Entfernung kariösen Dentins. Er ist rund und spiralförmig verzahnt, so dass Dentin bei rechts laufendem Motor durch Abtragen von Spänen entfernt wird (Banerjee et al., 2000; Dammaschke, 2005; IMC-Wiki, 2016). Aufgrund seiner technischen Konstruktion als rotierendes Instrument mit geometrisch definierter Schneidelinie ist der Rosenbohrer strenggenommen ein Fräser und kein Bohrer. Das Material ist meist Edelstahl, Werkzeugstahl, Schnellarbeitsstahl oder Hartmetall.

Der Rosenbohrer wird üblicherweise bei einer Umdrehungsgeschwindigkeit

keit von 500 U/min bis 4500 U/min angewendet (Dammaschke, 2005; IMC-Wiki, 2016). Aufgrund seiner Härte ist er in der Lage, kariöses Dentin, aber auch gesundes erhaltungswürdiges Dentin zu entfernen. So kommt es nicht selten zur Überexkavation, also dem Verlust gesunden oder erhaltenswerten Dentins (Banerjee et al., 2000). Grund ist, dass man mit dem Rosenbohrer nicht zwischen gesundem und kariös verändertem Dentin unterscheiden kann (Dammaschke, 2005). Schmerzhafte Verletzungen der gesunden Odontoblastenfortsätze sind die Folge; des Weiteren ist das Risiko, die Pulpa zu eröffnen, bei Hartmetallinstrumenten signifikant erhöht (Kunzelmann, 2011). Vorteile des Rosenbohrers ist die Möglichkeit, Karies sowohl im Schmelz als auch im Dentin exkavieren zu können.

2.2.3 Zirkoniumdioxidbohrer

Seit einigen Jahren sind Bohrer aus Zirkoniumdioxid verfügbar. Diese Hochleistungskeramik zeichnet sich durch enorme Schnittkantenfestigkeit, sehr gute Biegefestigkeit und Härte aus. Laut Studien sind Keramikbohrer (2000 KHN) (kurz für Knoop Hardness Number) ebenso wirksam wie herkömmliche Hartmetall-Rosenbohrer (1880 KHN) Dammaschke et al. (2008). Grund dürfte sein, dass beide Materialien einen ähnlichen Härtegrad aufweisen. Somit kann auch mit einem solchen Zirkoniumdioxidbohrer mühelos gesundes Dentin abgetragen werden.

Obwohl also der Werkstoff hinsichtlich seiner technischen Eigenschaften dem Hartmetallbohrer ähnelt und ein identisch invasiver Substanzabtrag zu erwarten ist, wird er in Studien als zahnhartsubstanzschonend eingestuft (Neves et al., 2011a), was objektiv betrachtet nur schwer nachvollziehbar ist.

2.2.4 Polymerinstrumente

Seit 2003 sind in der Zahnmedizin auch Kunststoffbohrer verbreitet. Sie bestehen aus einem speziellen Polymerkunststoff (Polyetheretherketon,

PEEK) und sollen es aufgrund ihrer Beschaffenheit ermöglichen, nur krankhaft verändertes Dentin abzutragen. Gesundes Primärdentin hat eine Knoop-Härte von 68 KHN, Sekundärdentin von 85 KHN (Craig et al., 1959). Seine Härte nimmt kontinuierlich vom Schmelz zur Pulpa hin ab: Unterhalb des Schmelzes ist es mit ca. 70 KHN am härtesten, an der Pulpa mit ca. 20 bis 30 KHN am weichsten (Fusayama et al., 1966; Meredith et al., 1996). Bei kariös verändertem Dentin steigt die Knoop-Härte im Übergang zum gesunden Dentin graduell. Den Bereich von 30 bis 50 KHN bezeichnet Ogawa als transparente Zone: Hier befindet sich nicht infiziertes, remineralisierbares kariöses Dentin (Ogawa et al., 1983). Modernes Polymer liegt mit einer Knoop-Härte von 70 KHN zwischen kariösem Dentin (0-30 KHN) und gesunden Dentin (70-90 KHN). Folglich sollte es möglich sein, bei Verwendung eines Polymerbohrers ausreichend harte – und somit remineralisierbare – kariöse Dentinanteile zu erhalten. Die hier genannten Härtegrade sind allerdings nur als Orientierung zu betrachten, da das Maß der die Knoop-Härte für rein plastische Werkstoffe (Metall) entwickelt wurde. Dentin ist jedoch ein viskoelastisches Material; hier wäre als Maß die sogenannte Martens-Härte (HM) besser geeignet: Sie gibt das Verhältnis der Maximalkraft zur zugehörigen Kontaktfläche wieder und wird in der Einheit Newton pro Quadratmillimeter angegeben. Die Martens-Härte bestimmt also nicht nur das plastische Verhalten eines Werkstoffes; vielmehr werden bei diesem Verfahren während einer Belastungs- und einer Entlastungsphase kontinuierlich die Kraft und die Eindringtiefe gemessen und auf Basis der Messkurve weitere Werkstoffparameter bestimmt (z.B. Eindringmodul, Eindringkriechen, plastische und elastische Verformungsarbeiten) (Wikipedia/Haerte, 2016).

Inzwischen sind rotierende Polymerinstrumente der ersten und der zweiten Generation zu unterscheiden.

2.2.4.1 Polymerinstrumente der ersten Generation

Der erste Polymerbohrer wurde 2003 von Professor Daniel Boston an der Temple University in Philadelphia entwickelt und von der Firma SS White Burs unter dem Namen SmartPrep zur Serienreife gebracht (Kunzel-

mann, 2011). Die Schneiden des Bohrers sind schaufelförmig und verlaufen nicht spiralförmig, sondern geradlinig. Der Bohrer hat eine KHN von 50 und entfernt ausschließlich erweichtes kariöses Dentin.

Zahlreiche Studien haben bestätigt, dass der SmartPrep weniger Dentin abträgt als der konventionelle Metallbohrer (Dammachke et al., 2006a; Prabhakar and Kiran, 2009). Im Vergleich zum Hartmetall-Rosenbohrer macht der Unterschied im Substanzabtrag durchschnittlich 0,5 mm aus (Tsolmon, 2008). Mit diesem substanzschonenderen Vorgehen erhöht sich die Wahrscheinlichkeit, dass remineralisierbares Dentin verbleibt. Sicher ist in jedem Fall, dass eine Übertherapie vermieden wird.

Nach den ersten Versuchen hatte man allerdings auch materialbedingte Nachteile festgestellt: Der Schaft des SmartPrep war aus Metall, das Arbeitsteil aus Polymer; Letzteres erwies sich als so weich, dass es sich während der Anwendung verformte (Boston, 2003).

2.2.4.2 Polymerinstrumente der zweiten Generation

Polymerbohrer der zweiten Generation werden aus einem härteren Material gefertigt. Mit einer Härte von ca. 70 KHN – vergleichbar der von gesundem Dentin – sollte dieses neue Material nun geeignet sein, kariöses Dentin selektiv zu entfernen. Auch der hier verwendete PolyBur P1 gehört der zweiten Generation an (PolyBur P1, Patent: DE 1020080 10049B3 (Quelle: www.dpma.de), Komet/Gebr. Brasseler, Lemgo).

Im Unterschied zur ersten Generation ist die Schneidengeometrie hier an die des Rosenbohrers angelehnt. Auch ist der Schaft weitaus graziler gestaltet, so dass das Instrument für kleine Kavitäten besser geeignet ist. Dank der Elastizität in diesem Bereich wird übermäßiger Anpressdruck durch den Behandler vermieden.

Seit 2010 ist ferner ein Nachfolger des SmartPrep mit Namen SmartBurs 2 erhältlich (Anbieter: SS White Burs, Lakewood/USA, US-Patent: Nr. 6, 106,291 und 6,347,941; deutscher Vertrieb: atec Dental, Ebringen), zu dem aber bislang noch keine klinische Studie vorliegt. Der SmartPrep

wurde hier insofern weiterentwickelt, als die Schneiden jetzt spiralförmig und nicht mehr geradlinig verlaufen, allerdings sind sie nach wie vor schaufelförmig.

2.2.4.3 Anwendung von Polymerinstrumenten

Der Zugang zur Kavität wird wie gewohnt mit rotierenden oder oszillierenden Diamant- und Hartmetallinstrumenten hergestellt. In den peripheren Anteilen der Kavität kann kariös erweichtes Dentin mit Hartmetall-Rosenbohrern entfernt werden, in den pulpanahen Anteilen kommt das Polymerinstrument zum Einsatz (Kunzelmann, 2011). Es soll kariöses Dentin entfernen können, ohne gesundes Dentin anzugreifen: Die Polymerschneiden nutzen sich bei Kontakt mit gesundem Dentin ab und werden stumpf (Dammachke, 2005).

Wie herkömmliche Rosenbohrer werden Polymerinstrumente in einem grünen oder blauen Winkelstück bei einer Drehzahl von 1000 bis 5000 Umdrehungen/min angewendet. (Hier wurden die Versuche mit der ISO Größe 014 durchgeführt.)

2.2.5 Fluorescence-Aided Caries Excavation (FACE)

Mit einem Fluoreszenz-kontrolliertem System (Fluorescence-Aided Caries Excavation FACE) kann der Umstand, dass sich die fluoreszenzoptischen Eigenschaften von Dentin bei kariösem Befall verändern, zur selektiven Kariesentfernung genutzt werden. Dazu werden Farbstoffmoleküle (Fluorophore) in der kariösen Läsion mit Licht bei 405 Nanometer zur Fluoreszenz angeregt; anschließend wird der Dentinanteil, dessen Fluoreszenzantwort im orangeroten Farbbereich liegt, mit einem Winkelstück und einem konventionellen Rosenbohrer selektiv exkaviert (Kunzelmann, 2011; Lennon et al., 2002, 2009; Lai et al., 2014). Dieses System ist kommerziell unter dem Produktnamen Facelight von WH oder SiroInspect von Sirona erhältlich.

Die in einer Läsion vorhandenen Fluorophore können auch bei Anwendung eines Lasers als Feedbacksystem genutzt werden (KEY Laser 3+, KaVo, Biberach) (Krause et al., 2007; Tao and Fried, 2009; Kunzelmann, 2011).

2.3 Chemomechanische und biochemische Präparationsverfahren

2.3.1 Chemomechanische Verfahren

Bereits seit 1980 existiert ein chemomechanisches Verfahren, in dem Natriumhypochlorit mit den Aminosäuren Leucin, Lysin und Glutaminsäure vermischt wird (Handelsname: Carisolv®, früher Caridex; Anbieter: Medi Team, Göteborg/Schweden). Bei Vermischen der Komponenten reagiert das Natriumhypochlorit mit den Aminosäuren zu Chloraminen, wobei Cl⁻ nur instabil an die Aminogruppe gebunden ist. Dies ermöglicht die Chlorierung wichtiger funktioneller Gruppen innerhalb der Kollagenstruktur. Die bereits geschwächte Kollagenstruktur wird zerstört und somit ein Teil des kariösen Dentins gelöst. Dieses angelöste Material schabt man sodann mit einem speziellen Handinstrument ab.

Der therapeutische Endpunkt liegt vor dem gesunden Dentin, sofern man die Dentinhärte als Kriterium für die Differenzierung zwischen krank und gesund wählt (Tsolmon, 2008; Kunzelmann, 2011). Das umliegende Pulpengewebe wird nicht beschädigt; das Produkt ist biokompatibel (Dammaschke, 2001; Dammaschke et al., 2006b; Bulut et al., 2004). Da beim Anmischen des Produktes in einer Sekundärreaktion Pyrrol-2-Carboxylsäure gebildet wird, hat Carisolv zudem eine desinfizierende Wirkung (Lima et al., 2005).

Obgleich die Wirksamkeit der Methode durch eine Reihe klinischer Studien belegt ist (Ericson et al., 1999; Peric et al., 2009; Bohari et al., 2012; Banerjee et al., 2000; Kotb et al., 2009; Bussadori et al., 2005; Hamama et al., 2013; Dammaschke, 2001; Dammaschke et al., 2006a;

Splieth, 2004), findet Carisolv bislang wenig Akzeptanz. Grund ist möglicherweise, dass die Anwendung eine weichere Zahnoberfläche hinterlässt (Maragakis et al., 2001). Dies deshalb, weil Carisolv überwiegend denaturiertes Dentin auflöst und das verbleibende, remineralisierbare Dentin weniger hart ist als gesundes Dentin.

2.3.2 Biochemische Verfahren

2.3.2.1 Auf Pepsin-Basis

Biosolv® (3M ESPE AG, Seefeld) ist ein biochemisches Zweikomponentenverfahren zum Entfernen von Karies. Es enthält 1-7 kollagenolytisch wirksame Enzyme (insbesondere Serin-Carboxyl-Proteasen) sowie mindestens eine Säurekomponente (organische oder anorganische Säure bzw. Mischung aus beiden plus Puffersystem, z.B. Phosphatpuffer), so dass der pH-Wert der Lösung zwischen 1 und 5 beträgt. Nach dem Auftragen des Produkts wird die kariöse Dentinsubstanz von den Säuren unspezifisch und von den Proteasen spezifisch gespalten. Bei diesem Prozess wird ausschließlich denaturiertes Kollagen entfernt; remineralisierbares Kollagengewebe, das noch Hydroxylapatit enthält, bleibt zum Teil erhalten. Die Oberflächenstruktur ist demnach auch mit dieser Therapie (wie auch bei Verwendung von Carisolv) weicher (Tsolmon, 2008). In Studien wurde das angelöste Dentin bislang mit eigens vom Hersteller entwickelten Handinstrumenten entfernt (Tsolmon, 2008; Dipsche, 2009). Die Anwendungssicherheit dieser Enzymlösung konnte in einer klinischen Studie bereits nachgewiesen werden (Dipsche, 2009). Das Produkt ist allerdings derzeit noch nicht kommerziell verfügbar.

2.3.2.2 Auf Papain-Basis

In Brasilien ist eine Enzymlösung auf Basis von Papain mit ähnlicher Wirkungsweise kommerziell verfügbar (Handelsname Papacárie; Hersteller: Fórmula Ação, São Paulo) (Bussadori et al., 2005; Kotb et al., 2009; Bussadori et al., 2011; Bohari et al., 2012). Auf dem deutschen Markt ist

sie bislang nicht erhältlich. Klinische Studien belegen eine hohe Patientenakzeptanz für die Lösung, obgleich ihre Einwirkzeit ca. 8 min beträgt (Carrillo et al., 2008; Goyal et al., 2015). Laut weiteren Untersuchungen ist die Dentinhärte des verbliebenen Gewebes niedriger als bei gesundem Dentin, die Oberfläche stärker mit Mikroorganismen kontaminiert (Gupta et al., 2013; Ammari et al., 2014). In einer Studie konnte für die verbliebene Zahnhartsubstanz nach zwölf Monaten eine hohe Remineralisierungsrate röntgenologisch nachgewiesen werden (Bussadori et al., 2014).

Kapitel 3

Ziel der Studie

Übergreifendes Ziel der hier beschriebenen Studie war es, zu untersuchen, inwieweit neue, schonende Behandlungsmethoden für Dentinkaries eine Alternative zur konventionellen Exkavation mit dem Hartmetallbohrer bieten könnten. Im Fokus standen selbstlimitierende Methoden: Darunter wird hier die Exkavation mittels Polymerbohrer verstanden, sowohl alleine als auch in Verbindung mit biochemischen und chemomechanischen Verfahren. Die unterschiedlichen selbstlimitierenden Exkavationsmethoden waren unter objektiven Versuchsbedingungen mit dem konventionellen Ansatz zu vergleichen und die Vor- und Nachteile mit Blick auf eine nachhaltige zahnärztliche Versorgung herauszuarbeiten. Konkret sollte die Studie folgende Fragen beantworten:

Wie groß sind die Unterschiede in der Invasivität?

Dass selbstlimitierende Methoden schonender sind als die Exkavation per Hartmetallbohrer, geht aus der Literatur hervor. In der Studie galt es zunächst, die Eindringtiefe der unterschiedlichen Methoden konkret zu vergleichen. Dabei sollte mithilfe eines neuartigen, eigens zu konstruierenden Lagerschlitten-Bohrsystems ein exakt konsistentes Vorgehen und somit größtmögliche Objektivität sichergestellt werden.

Welchen Umfang hat die erhaltene Zahnschubstanz?

Das Volumen der mit den schonenden Methoden erhaltenen Zahnhartschubstanz sollte mithilfe des Mikrocomputertomographen (μ CT) quantifiziert werden.

Ist das erhaltene Gewebe überhaupt erhaltenswert?

Ob die Beschaffenheit des Dentins eine erfolgreiche Remineralisierung verspricht, war ebenfalls mithilfe des μ CT zu untersuchen: Anhand der Grauwerte in der Darstellung lässt sich der Mineralisierungsgrad der unterschiedlichen Gewebe berechnen.

Welche Bedingungen hinterlassen die Exkavationsmethoden für die anschließende Füllung?

Um dies zu beurteilen, war die Oberflächenmorphologie der Kavitäten vor und nach Aufbringen eines Dentinadhäsivs mithilfe des Rasterelektronenmikroskops vergleichend zu analysieren. Insbesondere war dabei zu prüfen, ob das demineralisierte und somit weniger dichte Dentin für eine Füllung vergleichbar gute Bedingungen bietet wie konventionell exkaviertes Dentin. Kriterium dafür ist der Umfang der bei Exkavation entstehenden Schmierschicht sowie der sich daraus bildenden Smear Plugs (Schmierschicht-Pfropfen) in den Dentintubuli.

Wie gut würden Füllungen nach Exkavation an den Zähnen haften?

Abschließend war der Haftverbund zwischen Komposit und Zahn zu analysieren, sowohl im Vergleich zwischen den Exkavationsmethoden als auch im Vergleich zu gesundem Dentin. Als geeigneter Ansatz hierfür wurde der Haftzugversuch identifiziert.

Kapitel 4

Material und Methode

4.1 Arbeitsmaterialien

4.1.1 Proben

Zur Durchführung der verschiedenen In-Vitro-Versuche wurden Proben hergestellt. Dafür wurden extrahierte, tief kariöse menschliche Zähne der zweiten Dentition verwendet, die nach Extraktion mit einer Kürette von Geweberesten gereinigt und in 0,8%iger Natriumazidlösung gelagert wurden.

Die Proben wurden für jeden Versuch in unterschiedliche Probengruppen unterteilt, entsprechend den jeweiligen Erfordernissen.

4.1.2 Polymerbohrer

In dieser Studie wurde ein Polymerbohrer der zweiten Generation verwendet: der PolyBur P1 von Der Fa. Komet/Gebr. Brasseler (Lemgo). Er dient zum Abtragen von kariös verändertem Dentin und soll mit leichtem Anpressdruck angewendet werden. Im Gegensatz zu herkömmlichen Rosenbohrern wird nach Primärpräparation die Exkavation nicht von pe-

ripher nach zentral, sondern Schicht für Schicht von zentral nach peripher durchgeführt, um Kontakt mit den härteren Zahnhartsubstanzen zu vermeiden (Damaschke, 2005). Zunächst wird die zentrale Schicht mit wenig Anpressdruck und dann die periphere Schicht entfernt. Im nächsten Durchgang wird diese Bewegung wiederholt, wobei der Anpressdruck etwas erhöht wird.

Der PolyBur ist ein Einweginstrument. Daher wurde jede Probe mit einem neuen Bohrer exkaviert.

4.1.3 Hartmetallbohrer

Die konventionelle Exkavationsmethode wurde mit dem Hartmetall-Rosenbohrer H 1 SEM der Firma Komet/Gebr. Brassler (Lemgo) durchgeführt. Wie der Polymerbohrer hatte auch der Hartmetall-Rosenbohrer die ISO-Größe 014.

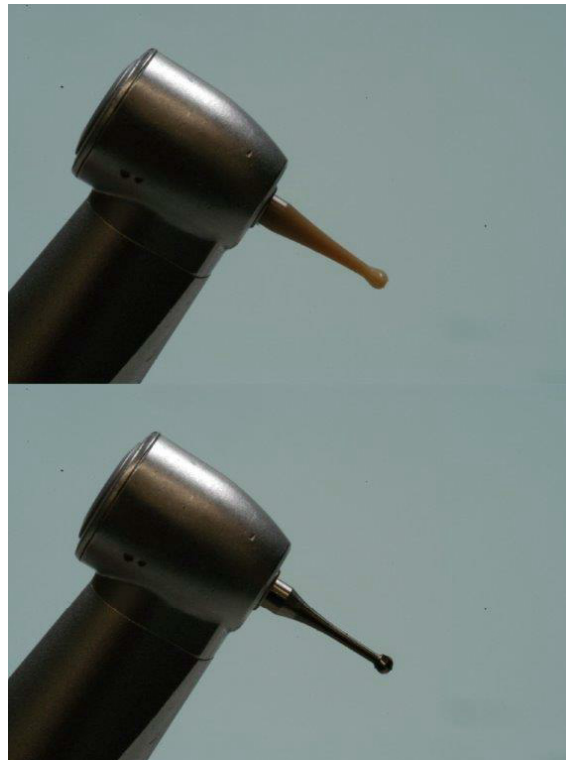


Abbildung 4.1: PolyBur P1 und Hartmetall-Rosenbohrer (Gebr. Brasseler, Komet)

4.1.4 Biochemisches Kariestherapieprodukt

Biosolv von der Firma 3M ESPE AG (82229 Seefeld, Deutschland) ist ein biomechanisches Verfahren zur Entfernung von Karies.

Die beiden Fläschchen mit den Produktkomponenten sind im Kühlschrank zu lagern und erst kurz vor Gebrauch auf Zimmertemperatur zu erwärmen. Dann werden die Inhalte beider Fläschchen in einer Einwegspritze aufgezogen und, um ein möglichst homogenes Gemisch zu erhalten, nochmals in eines der Fläschchen eingebracht und erneut aufgezogen. Durch das Zusammenmischen werden die beiden Komponenten aktiviert und bilden eine Gel-artige Lösung. Sie bleibt laut Herstellerangaben 60 min wirksam.

Nach Applikation des Produktes auf den Zahn löst dieses das kariöse Dentinegewebe; das dadurch eingetrübte Gel wird nach einer Einwirkzeit von 60 s mittels eines Instruments entfernt und dann herausgespült. Der gesamte Vorgang ist so lange zu wiederholen, bis sich neu eingebrachtes Gel nicht mehr eintrübt. Verwendet wurde hier Biosolv3 mit der Chargennummer BS-H-0774 (Abb. 4.2).

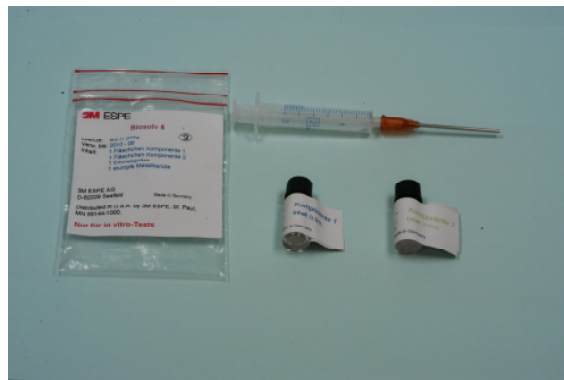


Abbildung 4.2: *Biosolv 3*

4.1.5 Chemomechanisches Kariestherapieprodukt

Carisolv® von der Firma Medi Team Dental (43363 Sävedalen, Schweden) ist ein chemomechanisches Verfahren zur Entfernung von Karies (siehe auch Kapitel 2 – Literaturübersicht).

Bei der Multimix-Packung werden die Gelkomponenten jeweils in der für eine Behandlung erforderlichen Menge durch Druck auf den Kolben exprimiert. Das Gel wird im Vorderteil der Spritze (statischer Mischer) automatisch in den richtigen Anteilen gemischt. Ohne statischen Mischer kann das Gel auch manuell gemischt werden. Die Kavität wird mit Gel bedeckt und wirkt 30 s ein, bis das kariöse Dentin erweicht ist. Anschließend wird das aufgelöste Dentinegewebe mit dem Wasserspray entfernt und dann getrocknet. Dieser Vorgang wird einmal wiederholt.

Das geöffnete Carisolv kann während des Arbeitstages bei Zimmertemperatur gelagert werden; ansonsten ist es im Kühlschrank zu lagern. Im Versuch wurde eine Packung mit der Chargennummern 09-002 verwendet (Abb. 4.3).



Abbildung 4.3: Carisolv

4.1.6 Dentinadhäsiv

Als Dentinadhäsiv wurde Clearfil SE Bond von der Firma Kuraray Medical, Inc. (New York, NY, USA) eingesetzt. Es handelt sich hierbei um ein zweischrittiges Adhäsivsystem, bestehend aus einem selbstätzenden

Primer und einem Adhäsiv. Der Primer muss nach Herstellerangaben 20 s einwirken und 10 s mit der Polymerisationslampe ausgehärtet werden. Hier wurde eine Lampe von Blue-phase (FL-9494 Schaan, Liechtenstein, Ser. No 1547581) verwendet.

4.1.7 Komposit

Als Komposit diente in einigen Versuchen Ceram X Duo von der Firma Dentsply (York, PA, USA) in der Farbe Dentin Shade Duo A3, Chargennummer 0903002228, Exp: 2011-09.

4.2 Vorgehen

Im Einklang mit dem Ziel der Studie, die Ergebnisse der unterschiedlichen Exkavationsmethoden zu vergleichen sowie Quantität und Qualität des erhaltenen Zahngewebes zu ermitteln, wurden vier Untersuchungen durchgeführt. Diese sind im Folgenden in ihrer logischen Reihenfolge vorgestellt, da die Ergebnisse aufeinander aufbauen. (Tatsächlich fand die computertomographische Untersuchung zeitlich vor dem Lagerschlittenversuch statt, da der Lagerschlitten erst noch gebaut werden musste.)

Hervorzuheben ist, dass die biochemischen und chemomechanischen Verfahren in allen vergleichenden Versuchen in Kombination mit dem Polymerbohrer angewendet wurde; d.h. das erweichte Dentin wurde nicht wie sonst üblich mit Handinstrumenten entfernt, sondern direkt mit dem Polymerbohrer exkaviert.

4.2.1 Versuch mit dem Lagerschlitten-Bohrsystem

In diesem Versuch ging es darum, die unterschiedlichen Eindringtiefen verschiedener Exkavationsarten an derselben kariösen Stelle miteinander zu vergleichen. Hierfür wurde ein Lagerschlitten-Bohrsystem verwendet,

das eigens für den Versuch von der Fa. Syndicad nach unserer Spezifikation angefertigt wurde.

Die Versuchsanordnung besteht aus einem kugelgelagerten Schlitten, in dem die Proben zu befestigen sind und dessen Bewegungsrichtung radial zum rotierenden Instrument verläuft. Über einen Seilzug mit Umlenkrolle ist der Schlitten mit einem Gewicht (150 g) verbunden. So kann eine definierte Vorschubkraft von ca. 1,5 N gewährleistet werden. An der Apparatur ist eine Messuhr (Mitutoyo, Typ IDU 25) angebracht, welche die jeweilige Eindringtiefe der Exkavation in μm misst.

Die rotierenden Instrumente sind in ein blaues Winkelstück eingespannt (Intramatic Lux 2 24 LN; Fa. KaVo, Biberach), das als Greifarm für das rotierende Instrument fungiert. Zur Dämpfung der Schwingungen ist der Greifarm in einer gummibeschichteten Halterung am Schlittengerüst fixiert (Abb. 4.4). Zusätzlich kann der Abstand zwischen dem Winkelstück bzw. dem rotierenden Instrument und der Probe mittels einer Fixierschraube variiert werden. So lässt sich die Position der Bohrschneiden zum Präparationsobjekt genau einstellen.

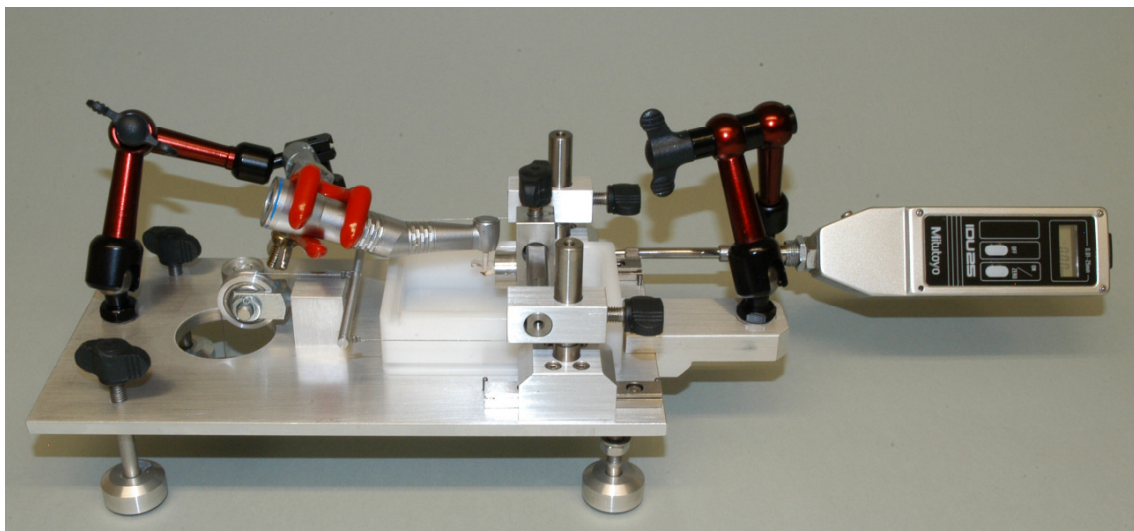


Abbildung 4.4: Lagerschlitten - Bohrsystem nach Konstruktionsvorgaben von Prof. Dr. Kunzelmann (Konstruktion: Fa. Syndicad)

4.2.1.1 Einteilung der Gruppen

Drei Probengruppen wurden definiert (Tabelle 4.1):

1. Polymerbohrer
2. Polymerbohrer plus biochemisches Verfahren (Biosolv)
3. Polymerbohrer plus chemomechanisches Verfahren (Carisolv)

Für die Exkavation mit dem Hartmetallbohrer wurde keine eigene Gruppe benötigt, da diese im Anschluss an den Proben aller drei Gruppen durchzuführen war.

| Gruppe | Anzahl | Selbstlimitierende Verfahren | Anschließende Exkavation mit dem Hartmetall-Bohrer |
|--------|--------|------------------------------|--|
| 1 | 24 | Polybur | ja |
| 2 | 24 | Polybur und Carisolv | ja |
| 3 | 24 | Polybur und Biosolv | ja |

Tabelle 4.1: *Lagerschlittenversuch – Gruppeneinteilung*

4.2.1.2 Vorbereitung der Proben

Als Probenmaterial dienten 21 Zähne der zweiten Dentition mit Dentinkaries. An ihnen wurde zunächst der Schmelzkaries mittels eines Hartmetall-Rosenbohrers exkaviert: Da Polymerbohrer aufgrund ihrer geringen Härte nur zur Exkavation im Dentin anzuwenden sind, war dies ein notwendiger Präparationsschritt, um für den Versuch gleichwertige Voraussetzungen für alle Exkavationsmethoden zu schaffen und mögliche Limitationen durch Restzahnschubstanz zu beseitigen.

Die Zähne wurden in 2 mm dicke Scheiben geschnitten. So entstanden insgesamt 72 Proben, die über die drei Gruppen verteilt wurden. Jede Probe wurde auf einen speziell angefertigten Probenteller (Fa. Syndicad) gegeben und in Komposit (Clearfil Majesty Esthetic) eingebettet. Jeweils

24 Proben wurden mit Biosolv bzw. Carisolv behandelt. Alle Präparations-schritte fanden ausschließlich im Dentin der Proben statt.

4.2.1.3 Durchführung des Versuchs

Die Probenhalter mit den Proben wurden nun jeweils im Probenhalter befestigt, der sich zwischen den beiden zum Schlitten verbundenen Lager-schienen befindet. So waren die Proben radial zur Bohrerschneide platziert. Der Abstand wurde so eingestellt, dass die Schneiden in Kontakt mit der kariösen Fläche der Zahnscheibe waren. Danach wurde bei einer Umdrehungszahl von 1000 U/min bei gleichmäßigem Vorschub die Dentinkaries zuerst mit dem Polymerbohrer, dann an derselben Stelle anschließend mit dem Hartmetallbohrer penetriert. Der Vorschub in μm wurde jeweils mit einer Messuhr gemessen, um die Differenz zwischen den Eindringtiefen zu ermitteln. Nach jeder Penetration einer Probe wurde das Instrument ausgewechselt.

4.2.2 Versuch mit dem μCT

Mit dem Mikrocomputertomographen (μCT) lassen sich non-destruktive In-Vitro-Messungen durchführen. Die Funktionsweise ist wie folgt: Die Röntgenquelle des Geräts strahlt kegelförmig auf das Objekt, das sich um 360 Grad dreht. Die Strahlen werden durch das zu untersuchende Gewebe absorbiert; Aufschluss über den Grad der Absorption gibt ein Vergleich zwischen ausgesandter und gemessener Strahlungsintensität. Dabei ist der Vorteil der kleinen Strahlenquelle, dass das Objekt sehr nah positioniert und somit Schatten vermieden werden können. Die Folge ist eine bessere Auflösung und somit größere Schärfe. Eine wöchentliche Kalibrierung mit HAP-Phantom stellt reproduzierbare Messungen sicher.

Die Daten werden im Computer zu einem Volumendatensatz zusammengefügt und können in diversen 3D-Darstellungen visualisiert werden. So lassen sich Schnittbilder und 3D-Ansichten beliebiger Ebenen rekonstruieren. Dabei wird der Absorptionsgrad in verschiedenen Grauwerten dar-

gestellt, die sich bestimmten Geweben zuordnen lassen. Somit sind neben quantitativen auch qualitative Bestimmungen möglich; d.h. die Darstellung erlaubt es, pathologische Abweichungen von gesundem Gewebe zu erkennen.

Im vorliegenden Versuch wurde ein μ CT 40 (SCANCO Medical AG, Schweiz) genutzt, um einerseits das Volumen der mit selbstlimitierenden Methoden erhaltenen Zahnhartsubstanz genauer zu bestimmen und andererseits den Mineralisationsgehalt dieses Gewebes zu beurteilen.

4.2.2.1 Einteilung der Gruppen

Wie beim Lagerschlittenversuch wurden auch hier drei Probengruppen definiert:

1. Polymerbohrer
2. Polymerbohrer plus
3. Polymerbohrer plus Carisolv

Auch hier sollte der Hartmetallbohrer jeweils im Anschluss angewendet werden, so dass dafür keine weitere Gruppe erforderlich war.

4.2.2.2 Vorbereitung der Proben

Zur Vorbereitung wurden 12 Zähne mit Dentinkaries in 2 mm dicke Scheiben geschnitten. So ergeben sich insgesamt 30 Proben, je 10 für jede Probengruppe. Damit konnte jede selbstlimitierende Exkavationsmethode an derselben kariösen Stelle angewandt werden.

Die Proben wurden jeweils in einen eigens dafür angefertigten Probenteller in Komposit (Clearfil Majesty Esthetic) eingebettet und anschließend in einer definierten Position in den μ CT-Halter (Firma SCANCO Medical AG) eingebracht. Dieser wurde eigens dafür modifiziert: Eine zentrale Anforderung bestand darin, die Probe inklusive Probenhalter mehrmals in

exakt der gleichen Position zu positionieren und zu scannen, um eine Überlagerung der einzelnen 3D-Scans sicherzustellen.

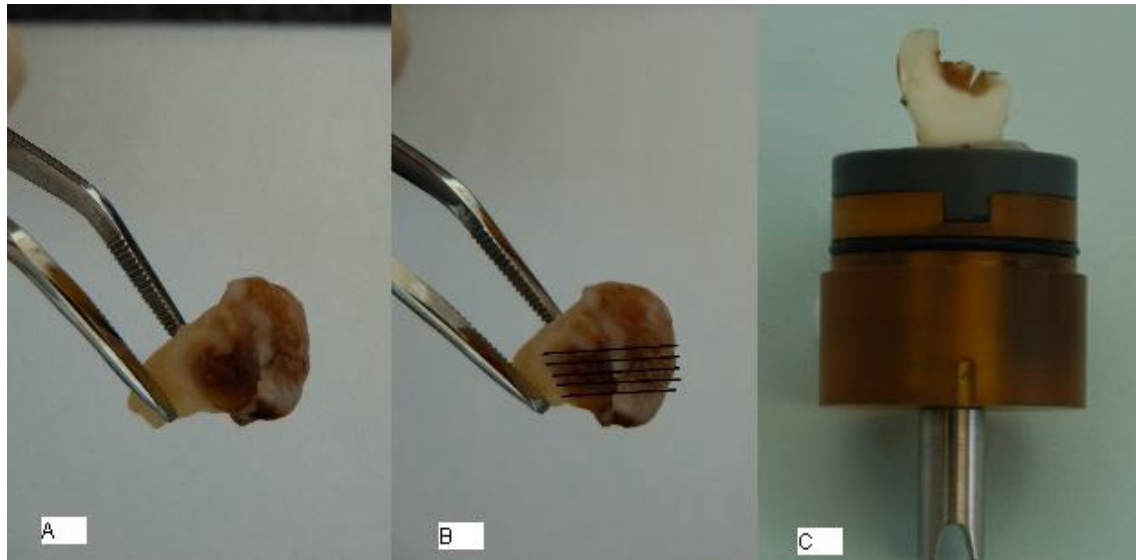


Abbildung 4.5: A: ganzer Zahn mit Karies, B: Zahn wird in 2 mm dicke Scheiben geschnitten, C: modifizierter MicroCT Halter mit Probe (2 mm dick)

4.2.2.3 Durchführung des Versuchs

Jede Probe wurde zuerst gescannt, dann mittels der jeweiligen selbstlimbierenden Methode (Polymerbohrer, Polymerbohrer plus Biosolv, Polymerbohrer plus Carisolv) bei 1000 U/min exkaviert, dann erneut gescannt. Anschließend wurde die Probe mit dem Hartmetall-Rosenbohrer ein zweites Mal exkaviert – ebenfalls bei 1000 U/min – und nochmals gescannt. Der Hartmetallbohrer wurde dabei nach visuellen Kriterien eingesetzt.

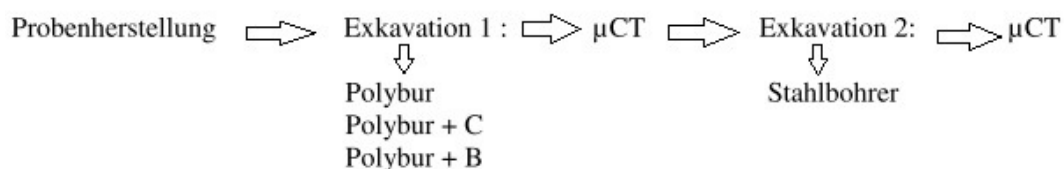


Abbildung 4.6: Versuchsdurchführung

Vor jeder Messung wurde eine Übersichtsaufnahme (*scout view*) erstellt und der zu scannende Bereich markiert: So ließ sich der kariöse Interessensbereich (*region of interest*), der sich in jeder Probe an einer anderen Stelle befand, für jede Untersuchung neu definieren. Bei den anschließenden μ CT-Messungen betrug die Auflösung 16 μ m; das entspricht einer Anzahl von 300 Schichten, die durch die Computersoftware zu einem 3D-Bild rekonstruiert werden.

Mit dem Programm ImageJ wurde das lokale Volumen der μ CT-Strukturen dreidimensional vermessen (Dougherty and Kunzelmann, 2007; Chiang et al., 2010). ImageJ gibt Aufschluss über die Dentinqualität direkt unter der Oberfläche des exkavierten Bereiches, also direkt am therapeutischen Endpunkt. Somit lässt sich der Mineralisationsgehalt genau dort, wo die einzelnen Exkavationsmethoden enden, mittels einer kalibrierten Methode bestimmen. Je höher er ist, desto mehr remineralisierbares und somit erhaltungswürdiges Dentin wurde entfernt.

4.2.3 Versuch mit dem Rasterelektronenmikroskop (REM)

In diesem Versuch ging es darum, die Oberflächenstrukturen der Kavitäten nach Exkavation mit den verschiedenen Methoden zu beurteilen und ggf. erste Rückschlüsse auf mögliche Eignung für das Einbringen von Füllungen zu ziehen.

4.2.3.1 Einteilung der Gruppen

Für diesen Vergleich wurden zunächst vier Probengruppen definiert:

1. Polymerbohrer
2. Polymerbohrer plus Biosolv
3. Polymerbohrer plus Carisolv
4. Hartmetall-Rosenbohrer

Jeder der Gruppen wurde dann nochmals unterteilt: ein Teil der Proben wurde mit Dentin-Bonding-Agent (Clearfil SE) behandelt, die übrigen Proben blieben ohne Haftvermittler.

4.2.3.2 Vorbereitung der Proben

Von kariösen Zähnen wurde die Dentinkaries zunächst mittels der verschiedenen oben genannten Exkavationsarten entfernt. Dann wurde in jeder Gruppe ein Teil der Proben mit dem Dentinadhäsiv Clearfil SE behandelt: Nach der Einwirkzeit des Primers (20 s) wurde das Adhäsiv appliziert und 10 s lang mit der Polymerisationslampe ausgehärtet. Jeder Zahn wurde anschließend mit Stickstoff auf -196°C heruntergekühlt und an einer durch das Zentrum der Kavität verlaufenden Sollbruchstelle in zwei Teile geteilt. Die so entstehenden Zahnproben wurden 12 Stunden in 10%iger Formaldehydlösung eingelegt und anschließend 1 min mit destilliertem Wasser abgespült.

Getrocknet wurden die Proben durch Einlegen in 50-, 75-, 85-, 90- und 100%igem Alkohol, jeweils 30 min lang in ansteigender Reihenfolge, gefolgt von einer Kritisch-Punkt-Trocknung: Dabei wird das Ethanol in der Druckkammer des Kritisch-Punkt-Trock-

ners (POLARON CPD E3100, Fa. Fisons Instruments, England) bei einer Temperatur von 10°C durch flüssiges CO_2 substituiert. Die Zahnproben werden anschließend auf 37°C erwärmt – den sogenannten Kritischen Punkt, an dem das flüssige CO_2 in den gasförmigen Aggregatzustand übergeht. So wird die Probe unter Erhaltung aller Mikrostrukturen für die Untersuchung mit dem Rasterelektronenmikroskop vorbereitet.

Nach der Ausschleusung aus der Druckkammer des Kritisch-Punkt-Trockners muss die Probe umgehend mit einem Metallfilm beschichtet werden, da sie sonst sehr schnell Luftfeuchtigkeit aufnimmt. Die Proben wurden daher im Sputtercoater (Edwards Sputter Coater S 150B, Sussex, UK) unter Vakuum und einem Arbeitsdruck von 0,3 atm bei 40 mA Strom 60 s lang mit Gold bestäubt (gesputtert), um eine elektrisch leitende Oberfläche zu erhalten. Die Sputter-Rate betrug ca. 15 nm/min.

4.2.3.3 Durchführung des Versuchs

Das Dentin sowie die Bruchstellenoberfläche wurde unter dem Rasterelektronenmikroskop betrachtet. Dazu wurden die Proben auf den REM-Probenhaltern so positioniert, dass der Detektor des Mikroskops sowohl die exkavierte Kavität als auch die Bruchstelle darstellen konnte.

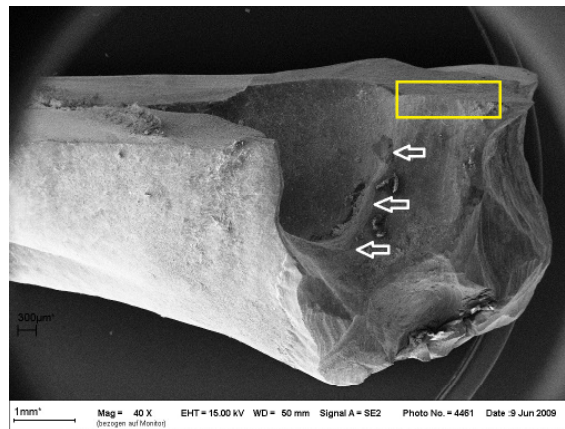


Abbildung 4.7: Eine Übersichtsaufnahme einer Probe im Rasterelektronenmikroskop, weiße Pfeile: Kavität, gelbes Rechteck: an der Bruchstelle wird die Kavität und die längs angeschnittenen Dentinkanälchen dargestellt

4.2.4 Haftzugversuch

Der Haftzugversuch sollte Aufschluss darüber geben, ob und ggf. wie sich die Haftfähigkeit der Kavitätenoberflächen nach Exkavation mit den verschiedenen Methoden unterscheidet. Verwendet wurde das computergesteuerte System μ -TBST (Microtensile Bond Strength Test).

4.2.4.1 Einteilung der Gruppen

Da hier die unterschiedlichen Exkavationsarten miteinander sowie mit gesundem Gewebe zu vergleichen waren, wurden für diesen Versuch fünf Probengruppen definiert:

1. Hartmetallbohrer
2. Polymerbohrer
3. Polymerbohrer plus Biosolv
4. Polymerbohrer plus Carisolv
5. Gesundes Dentin.

4.2.4.2 Vorbereitung der Proben

Für die Proben wurden extrahierte menschliche Zähne der zweiten Dentition ausgewählt, ein Teil davon mit kariösen Läsionen, ein Teil kariesfrei. Die Zähne wurden zunächst in Stäbchenform geschnitten: Unter Wasserkühlung wurden sie mit einer Diamantsäge (Isomet Low Speed Saw von der Firma Buehler, Düsseldorf) zuerst parallel zur Zahnlängsachse in 1 mm dicke Scheiben geteilt, dann in Stäbchen geschnitten. Als Ergebnis konnte jeweils eine Fläche von ca. 1 x 1 mm auf Haftzugfestigkeit geprüft werden. Bei den Proben mit einer Kavität, die der im Zahn ausgedehnten Dentinkaries entsprach, bestand die besondere Schwierigkeit darin, eine Fläche zu erhalten, die den Neigungswinkel von 15° nicht überschritt, da der Haftverbund ansonsten unter den einzelnen Gruppen nicht vergleichbar wäre.

Alle Proben wurden sodann in 0,8%iger Natriumazidlösung gelagert. Die kariösen Zähne der ersten vier Gruppen wurden mit den unterschiedlichen Exkavationsmethoden (siehe Gruppen) exkaviert. Die kariesfreien Zähne der Gruppe 5 wurden in der Mitte der Zahnkrone, wo der Dentinanteil am größten ist, gekappt.

Die im Dentin befindlichen Kavitäten wurden mit Bonding Agent (Clear-

fil SE) behandelt. Nach dieser Vorbehandlung wurde die Kavität mit dem Komposit restauriert und mit der Polymerisationslampe (Blue-phase, FL-9494 Schaan, 12 V DC, Liechtenstein, Ser. No 1547581) gemäß Herstellerangaben 20 s lang appliziert und polymerisiert. Anschließend wurden die Zähne 24 h bei 37° in destilliertem Wasser gelagert.

4.2.4.3 Durchführung des Versuchs

Die geschnittenen Stäbchen wurden mit einem Sofortklebstoff (Zapit von model-tray GmbH, Deutschland) im Mikrozug-Aufsatz befestigt und nach 3 min in einer Universalprüfmaschine (MCE 2000ST, Quick test Prüfpartner GmbH, Langenfeld/Deutschland) bei einer konstanten Vorschubgeschwindigkeit von 0.5 mm/min belastet. Pro Gruppe wurden 25 Stäbchen auf diese Weise untersucht. Um die Mikrozugfestigkeit [MPa] zu berechnen, wurde die zum Bruch der Proben benötigte Kraft [N] gemessen und durch die Fläche [mm²] der Probe dividiert.

Formeln:

$$H\ddot{o}he1[mm] \times Brei\ddot{t}e2[mm] = Fl\ddot{a}che[mm^2]$$

$$\frac{Kraft[N]}{Fl\ddot{a}che[mm^2]} = mechanischeSpannung[MPa]$$

Kapitel 5

Ergebnisse

5.1 Ergebnisse Lagerschlitten-Versuch

In diesem Versuch ging es um die Unterschiede im Substanzerhalt. Die Proben waren in drei Gruppen unterteilt worden:

1. Polymerbohrer
2. Polymerbohrer plus biochemisches Verfahren (Biosolv)
3. Polymerbohrer plus chemomechanisches Verfahren (Carisolv)

Sämtliche Proben waren zuerst mit der selbstlimitierenden Methode und dann an derselben Stelle mit dem Hartmetall-Rosenbohrer exkaviert worden.

Die statistische Auswertung mittels Post-hoc-Test (Tukey) ergab nur geringe Abweichungen zwischen den Ergebnissen der minimal-invasiven Methoden, aber einen statistisch signifikanten Unterschied gegenüber dem herkömmlichen Exkavationsverfahren (Abb. 5.1): Bei Einsatz des Polymerbohrers betrug die durchschnittliche Eindringtiefe 1,15 mm, bei zusätzlicher Verwendung von Biosolv 1,06 mm, bei zusätzlicher Verwendung von Carisolv 1,20 mm. Bei Exkavation mit dem Hartmetallbohrer hingegen betrug die durchschnittliche Eindringtiefe 1,86 mm. Demnach kann mit den genannten minimal-invasiven, selbstlimitierenden Karies-

therapien im Vergleich zur konventionellen Exkavation mittels Hartmetall-Rosenbohrer jeweils Zahnhartsubstanz im Umfang von 670 μm bis 820 μm erhalten werden (Tabelle 5.1).

Der besonders geringe Abtrag bei Anwendung von Biosolv könnte durch das darin enthaltene Glycerin zu erklären sein: Biosolv ist dadurch viskoser als Carisolv; die höhere Viskosität bewirkt vermutlich eine geringere Reibung und damit weniger Abtrag.

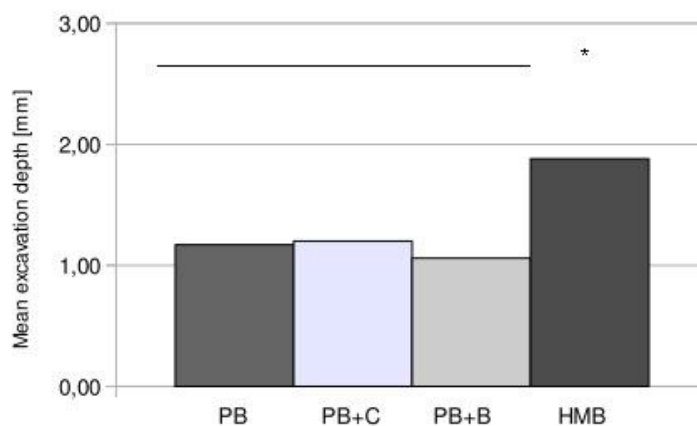


Abbildung 5.1: Eindringtiefen mit den unterschiedlichen Exkavationsmethoden.

| Gruppen | Polybur | Polybur + Carisolv | Polybur + Biosolv |
|---|-------------|--------------------|-------------------|
| Mittelwert (SD) nach self-limiting Exkavationen | 1,17 (0,69) | 1,20 (1,04) | 1,06 (0,73) |
| Mittelwert (SD) nach zusätzlicher Exkavation mit dem Stahlbohrer an der gleichen Stelle | 1,99 (1,01) | 1,87 (1,06) | 1,77 (0,84) |
| Differenz selflimiting – Stahl Exkavationen | 0,82 | 0,67 | 0,71 |

Tabelle 5.1: Tabelle Durchschnittliche Eindringtiefen der drei minimal-invasiven Verfahren im Vergleich zum herkömmlichen Verfahren (Angaben in mm; $p < 0,05$)

5.2 Ergebnisse μ CT -Versuch

Mit dem μ CT waren Quantität und Qualität der erhaltenen Substanz anhand derselben drei Probengruppen zu prüfen:

1. Polymerbohrer
2. Polymerbohrer plus biochemisches Verfahren (Biosolv)
3. Polymerbohrer und chemomechanisches Verfahren (Carisolv)

Nach Anwendung der selbstlimitierenden Methoden waren die Proben (nach klinischen Kriterien) mit dem Hartmetall-Rosenbohrer exkaviert worden.

Die Ergebnisse der Auswertung bestätigten, was schon der Lagerschlittenversuch gezeigt hatte: Bei Anwendung der selbstlimitierenden Methoden wurde signifikant mehr Zahnhartsubstanz erhalten als bei Exkavation mit dem Hartmetallbohrer. Eine Analyse dieser verbliebenen Zahnhartsubstanz auf ihren Mineralisationsgehalt (mittels Grauwertauswertung) ergab, dass es sich um remineralisierbares und somit erhaltenswertes Gewebe handelte.

5.2.1 Volumen des erhaltenen Gewebes

Zunächst bestätigten die 3D-Darstellungen, dass bei Exkavation mit dem Hartmetallbohrer mehr Substanz abgetragen wurde als mit den selbstlimitierenden Methoden (Abb. 5.2 und 5.3).

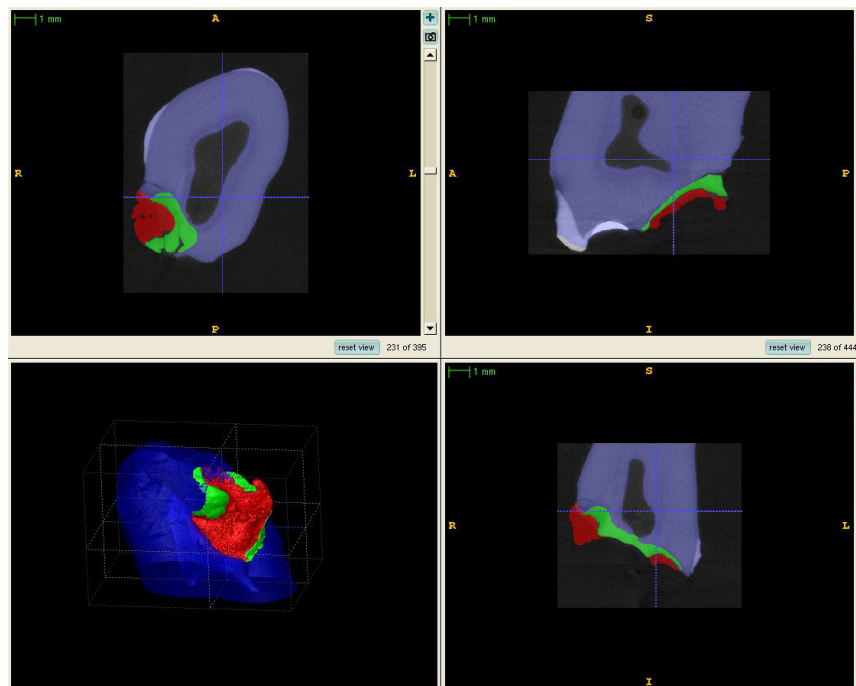


Abbildung 5.2: 3D-Darstellung des Exkavationsendpunktes der einzelnen Therapien. Rot: Substanzabtrag mit der selbstlimitierenden Methode; rot + grün: Substanzabtrag bei Exkavation mit dem Hartmetallbohrer; grün: Substanz, die mit den selbstlimitierenden Methoden erhalten werden kann

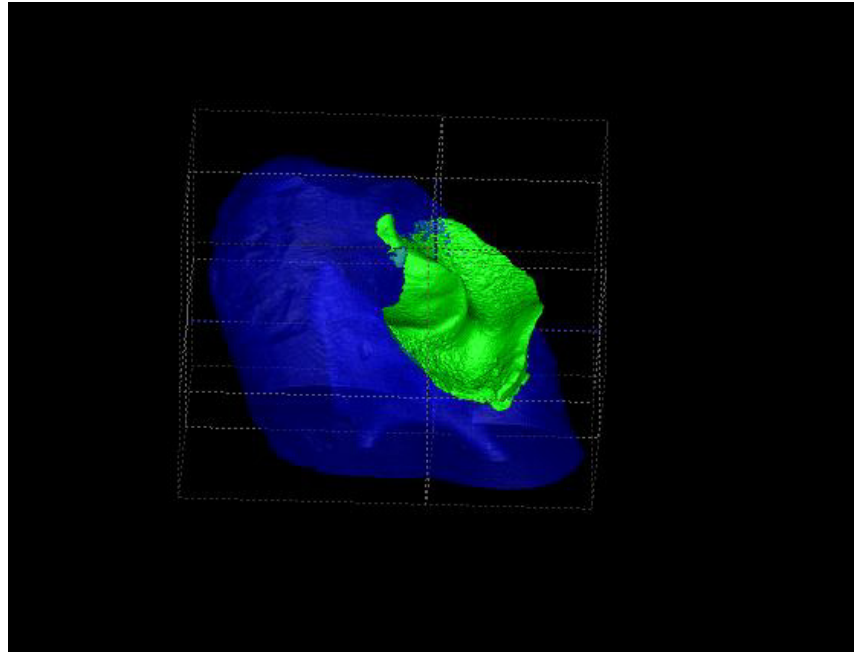


Abbildung 5.3: 3D-Darstellung des Exkavationsendpunktes: Vergleich zwischen selbstlimitierenden Methoden und Hartmetallbohrer. Grün: Volumen der Zahnschubstanz, die mit dem Hartmetallbohrer zusätzlich zur selbstlimitierenden Methode entfernt wird

In einer Probengruppe hatte der Hartmetallbohrer sogar die Pulpa eröffnet, wohingegen bei Exkavation mit dem Polymerbohrer ca. 100 μm mehr Substanz erhalten blieb (Abb. 5.4). Mithilfe des Programms ImageJ – und hier des Plug-ins Local Thickness – ließ sich das Volumen dieser Substanzdifferenz dreidimensional vermessen: Dabei ergaben sich 500 μm Substanzerhalt

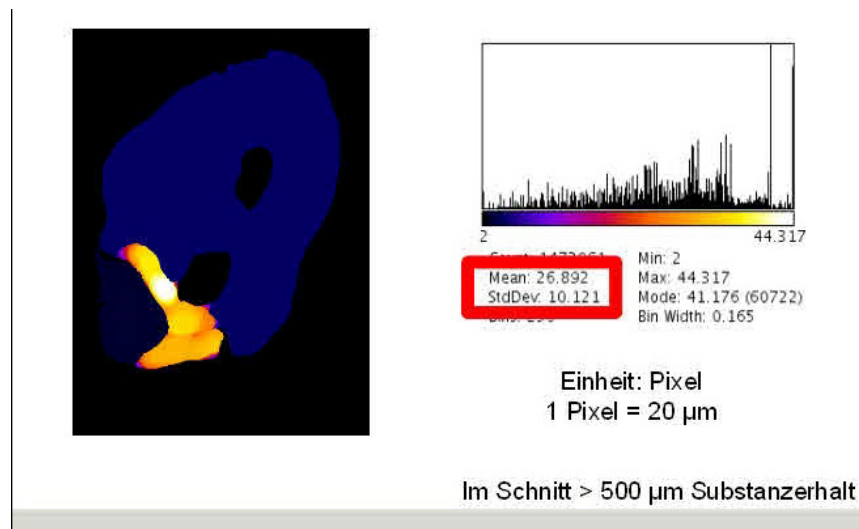


Abbildung 5.4: 3D-Darstellung: Differenz im Substanzabtrag mit Polymer- und Hartmetallbohrer; farbiger Bereich kodiert die mittlere Dicke (local thickness) in 3D. Gelb: Differenz des Abtrags zwischen PolyBur und Hartmetallbohrer; schwarz (zentral): Pulpa. Histogramm: Verteilung der mittleren Dicke (local thickness); rot: Mittelwert und Standardabweichung

Die Auswertung der 3D-Darstellung mittels ImageJ ergab, dass in allen drei Gruppen mit dem Hartmetallbohrer deutlich mehr Substanz abgetragen wurde als mit den selbstlimitierenden Methoden (Abb. 5.22). Konkret betrug der Differenzwert gegenüber Hartmetallbohrer in der Gruppe Polymerbohrer $498 \mu\text{m}$ (Standardabweichung: $132 \mu\text{m}$), in der Gruppe Polymerbohrer plus Carisolv $261 \mu\text{m}$ (Standardabweichung: $67 \mu\text{m}$) und in der Gruppe Polymerbohrer plus Biosolv $302 \mu\text{m}$ (Standardabweichung: $92 \mu\text{m}$); somit war der Substanzerhalt in der Gruppe Polymerbohrer am höchsten.

Eine Varianzanalyse per One-Way-Test zeigte innerhalb der selbstlimitierenden Verfahren einen signifikanten Unterschied zwischen der Gruppe Polymerbohrer und den anderen Gruppen: Bei Exkavation mit dem Polymehrbohrer alleine wurde mehr Substanz erhalten als bei zusätzlicher Anwendung der biochemischen oder chemomechanischen Verfahren. Allerdings wies diese Gruppe auch die größte Standardabweichung auf (Tabelle 5.2).

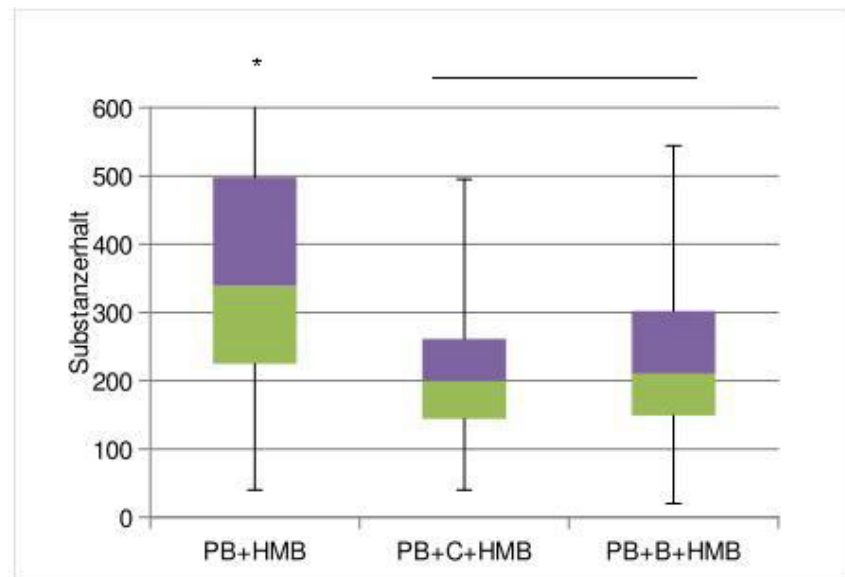


Abbildung 5.5: Vergleich des Substanzerhalts in den drei Gruppen – selbstlimitierende Verfahren versus Hartmetallbohrer

| Gruppen | Δ Polybur zu HMB | Δ Polybur + Carisolv zu HMB | Δ Polybur + Biosolv zu HMB |
|--|-------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|
| Mittelwert [Pixel] | 24,88 ^a | 13,06 ^b | 15,10 ^b |
| Mittelwert [μm] x 20 μm pro Pixel | 497,60 | 261,20 | 302,00 |
| Standardabweichung [μm] | 132 | 67 | 91,8 |

Tabelle 5.2: Vergleich des Substanzerhalts – selbstlimitierende Exkavationsverfahren versus Exkavation mittels Hartmetallbohrer (Angaben in μm ; $p < 0,05$ (One – Way – Test))

5.2.2 Mineralisationsgehalt des erhaltenen Gewebes

Aufschluss über die Qualität des Gewebes, das mit den selbstlimitierenden Methoden erhalten blieb, gab die Grauwertauswertung: Je geringer der Mineralisationsgrad des Dentins unter der Oberfläche der Kavität, desto mehr remineralisierbares und somit erhaltenswertes Dentin konnte erhalten werden. Hier wies die Analyse für die Gruppe Polymerbohrer

eine signifikant höhere Mineraldichte im erhaltenen Gewebe nach als in den beiden anderen Gruppen (Abbildung 5.5, Tabelle 5.3). Dies lässt darauf schließen, dass bei zusätzlicher Anwendung von Biosolv oder Carisolv mehr remineralisierbares Dentin erhalten bleibt. In der Gruppe Polymerbohrer 1,97 $[g/cm^3]$, Polymerbohrer plus Biosolv 1,77 $[g/cm^3]$ und Polymerbohrer plus Carisolv 1,65 $[g/cm^3]$. (Standardabweichungen Tabelle 5.3)

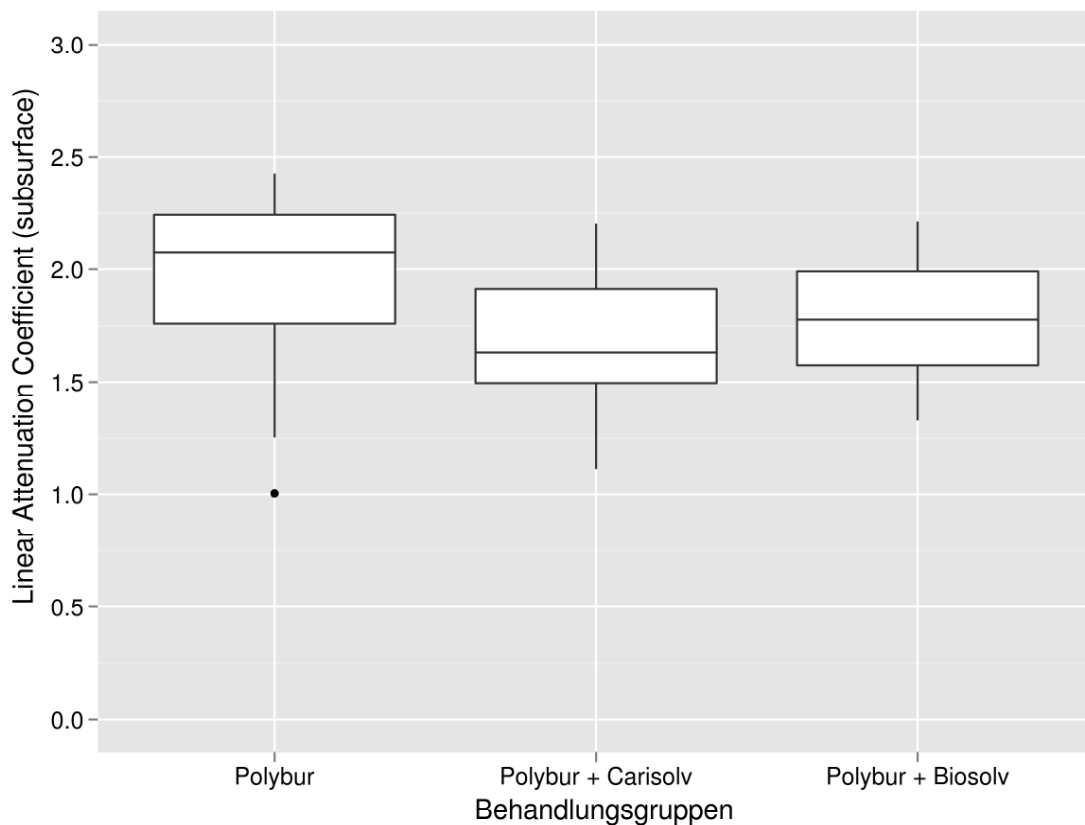


Abbildung 5.6: Vergleich zwischen Hartmetallbohrer und selbstlimitierenden Verfahren

| Gruppen | Polybur | Polybur + Carisolv | Polybur + Biosolv |
|--------------------|---------|--------------------|-------------------|
| Mittelwert | 1,97 | 1,65 | 1,77 |
| Standardabweichung | 0,33 | 0,29 | 0,24 |

Tabelle 5.3: *Mineraleichte laut Grauwertauswertung [in g/cm³]*

5.3 Ergebnisse Rasterelektronenmikroskop

Nach Exkavation der Dentinkaries mit den unterschiedlichen Methoden waren die Oberflächen sämtlicher Kavitäten in unterschiedlichem Ausmaß mit Stäbchenbakterien besiedelt, abhängig vom Progressionsstadium und dem Aktivitätsgrad der Dentinkaries. In der Gruppe Carisolv war das Ausmaß der Besiedlung aufgrund der antibakteriellen Wirkung der Lösung am geringsten.

Mit dem Rasterelektronenmikroskop waren nun die Schmierschichten auf der Kavitätenoberfläche sowie die dadurch gebildeten Smear Plugs zu prüfen, um erste Hinweise auf die mögliche Haftfähigkeit zu erhalten. Wie der Versuch ergab, hinterließ jede Exkavationsmethode eine unterschiedliche Oberflächenbeschaffenheit. Am höchsten schien die Haftfähigkeit – auf Basis der visuellen Beurteilung – nach Exkavation mit den kombinierten Methoden (Polymerbohrer plus Biosolv bzw. Carisolv), da die Oberflächen hier fast schmierschichtfrei und zudem mehrere Dentintubuli frei von sogenannten Smear Plugs (Schmierschicht-Pfropfen) waren.

5.3.1 Dentinkavitäten nach Exkavation mit dem Hartmetallbohrer

Der Hartmetall-Rosenbohrer hinterließ eine gleichmäßige Schmierschicht, die alle Dentintubuli-Öffnungen mit Smear Plugs verschloss (Abb. 5.7 und 5.8). Dies vermutlich deshalb, weil mit Stahlinstrumenten ein höherer Druck auf das härtere Gewebe ausgeübt wird, so dass auch der Stempeldruck auf die Smear Plugs höher ist.

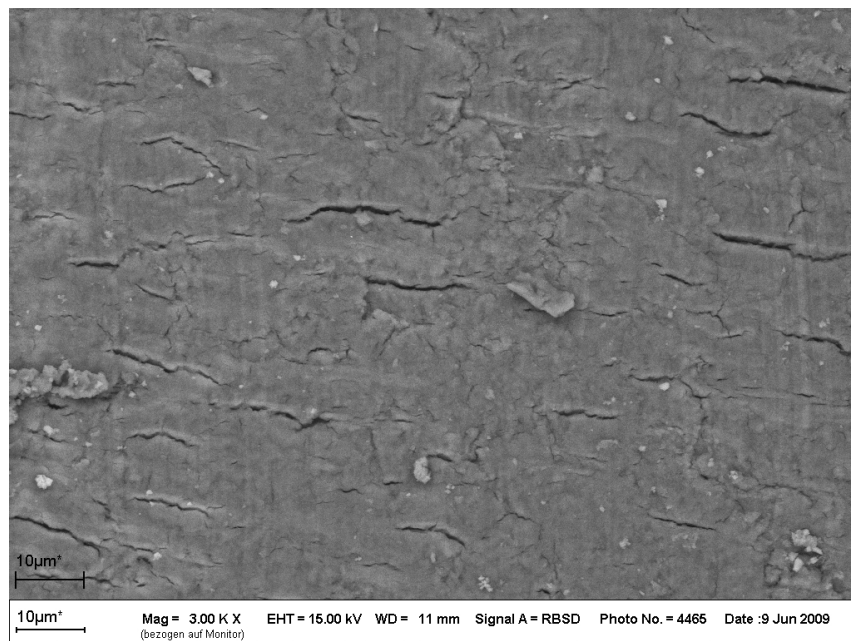


Abbildung 5.7: *Dentinoberfläche mit Schmierschicht nach Exkavation mit dem Hartmetall-Rosenbohrer (3000fach vergrößert)*

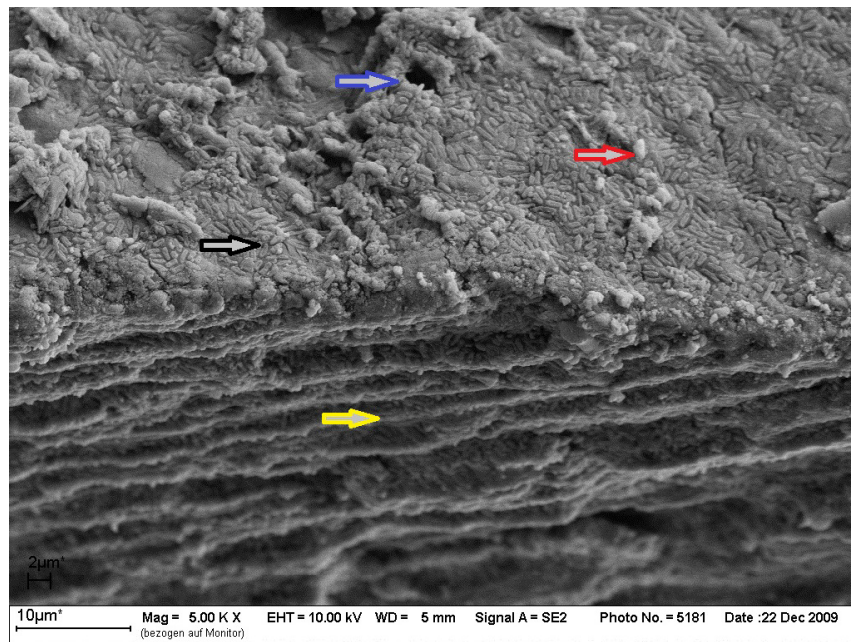


Abbildung 5.8: Dentinoberfläche nach Exkavation mit dem Hartmetall-Rosenbohrer (5000fach vergrößert). Gelber Pfeil: Bruchstelle; schwarzer Pfeil: Bakterien in der Schmier-schicht auf der Dentinoberfläche; roter Pfeil: Abrieb des Bohrers; blauer Pfeil: trotz Schmiersicht sichtbare Dentintubulus-Öffnung

5.3.2 Dentinkavitäten nach Exkavation mit dem Polymerbohrer

Der Polymerbohrer hinterließ nach der Exkavation ebenfalls eine Schmier-schicht, wobei allerdings im Unterschied zur Exkavation mittels Hartmetallbohrer – einige Dentintubuli-Öffnungen sichtbar waren (Abbildung 5.9 und 5.10). Die Schichtdicke der Schmier-schicht scheint also unregelmäßiger zu sein, vermutlich weil die Schneiden des Polymerbohrers weniger Druck ausüben.

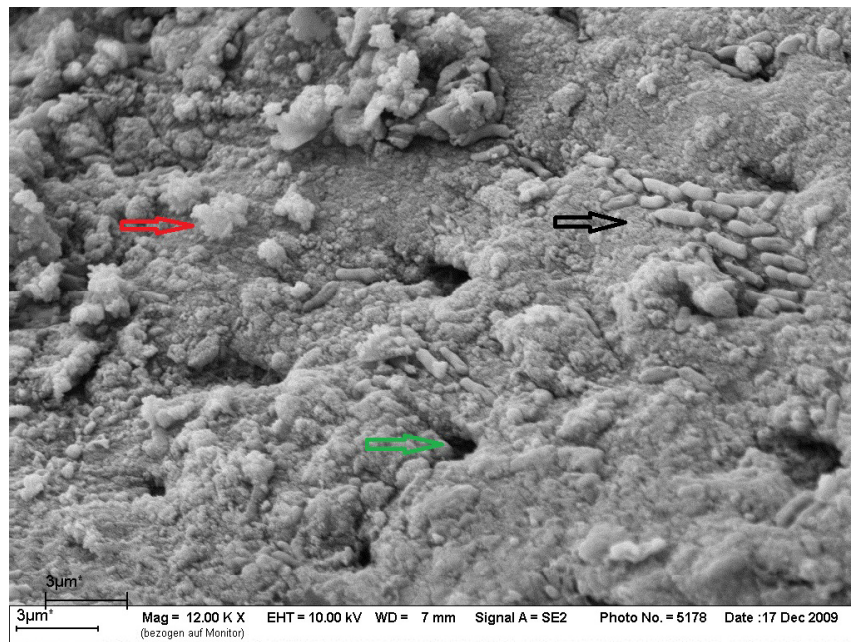


Abbildung 5.9: Dentinoberfläche nach Exkavation mit dem Polymerbohrer (12.000fach vergrößert). Grüner Pfeil: teilokkludierte Dentintubuli; schwarzer Pfeil: Bakterien; roter Pfeil: Abrieb des Bohrers

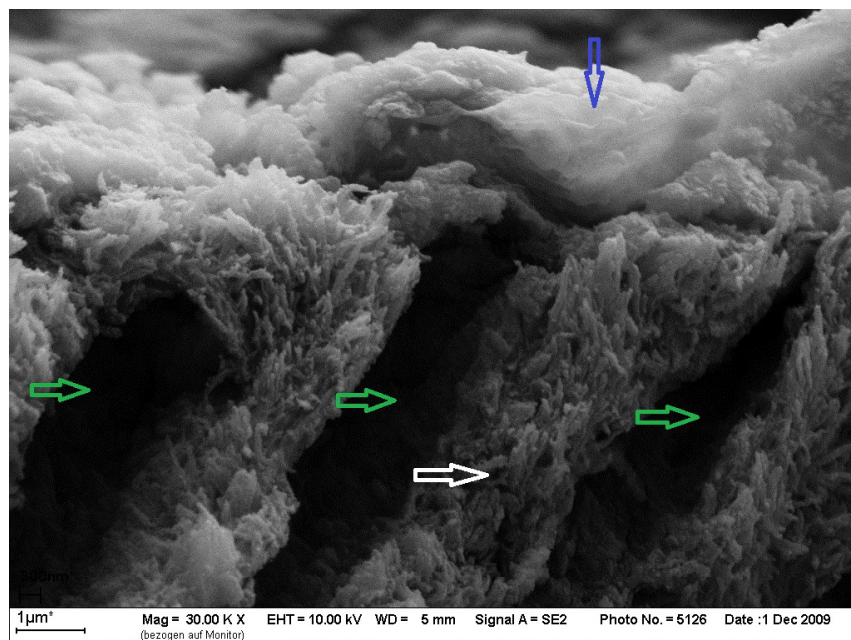


Abbildung 5.10: Schmierschicht und Bruchstelle mit Smear Plugs in den Dentintubuli nach Exkavation mit dem Polymerbohrer (30.000 fache Vergrößerung). Grüne Pfeile: Dentintubuli längs eröffnet; weißer Pfeil: intertubuläres Dentin; blauer Pfeil: Dentin ohne sichtbare Poren

5.3.3 Vergleich der Dentinkavitäten nach Exkavation mit dem Polymerbohrer und dem Hartmetallbohrer

Die Oberfläche der Kavität war nach Exkavation mit dem Hartmetallbohrer homogener als nach Anwendung des Polymerbohrers, vermutlich weil der PolyBur mit seinen weichen und stumpfen Schneiden die Karies “wegreibt“. Der Hartmetallbohrer hingegen schneidet aktiv; seine dünneren Stahlschneiden üben beim Exkavieren einen stärkeren Druck aus. Als Resultat hinterlässt er eine dünnere, aber auch stärker verdichtete Schmierschicht (Abbildung 5.11).

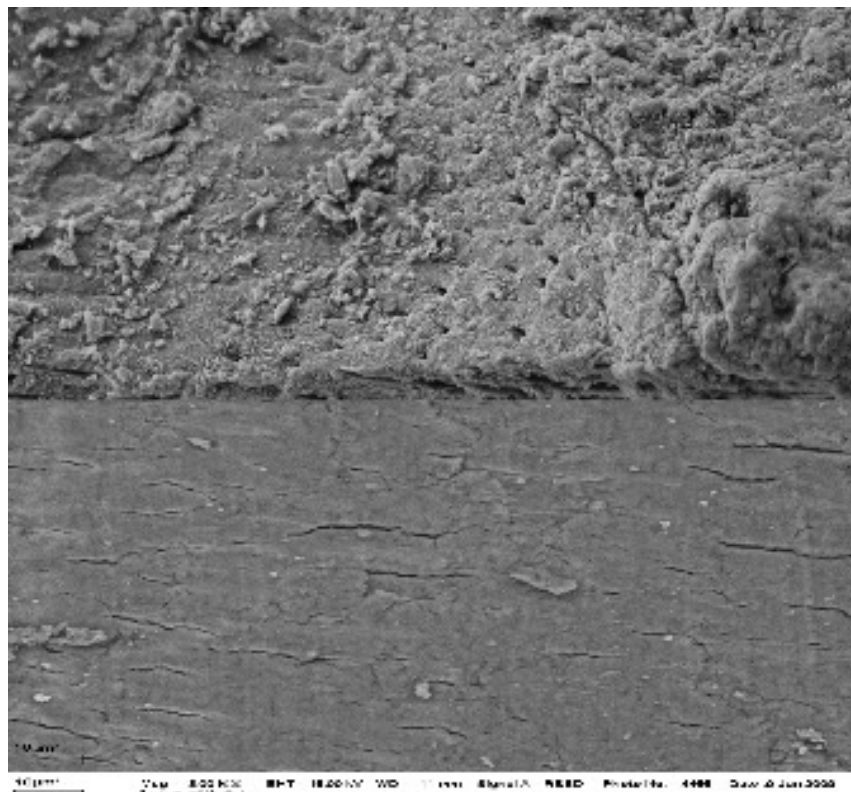


Abbildung 5.11: Oben: Mit dem Polymerbohrer exkavierte Dentinkavität (1.000fach vergrößert). Unten: Mit dem Hartmetallbohrer exkavierte Dentinkavität (7500fach vergrößert).

5.3.4 Dentinkavitäten nach Exkavation mit dem Polymerbohrer und Biosolv

Nach Exkavation mit dem Polymerbohrer in Kombination mit Biosolv zeigte sich die Dentinoberfläche schmierschichtfrei. Auch die Dentintubuli waren eröffnet; die darin befindlichen Smear Plugs waren offenbar aufgelöst worden (Abbildung 5.12). Gründe dürften im sauren pH-Wert von Biosolv sowie der proteolytischen Wirkung liegen. Auf der exkavierten Dentinoberfläche sind Kollagenfasern und intertubuläres Dentin zu erkennen (Abbildung 5.13).

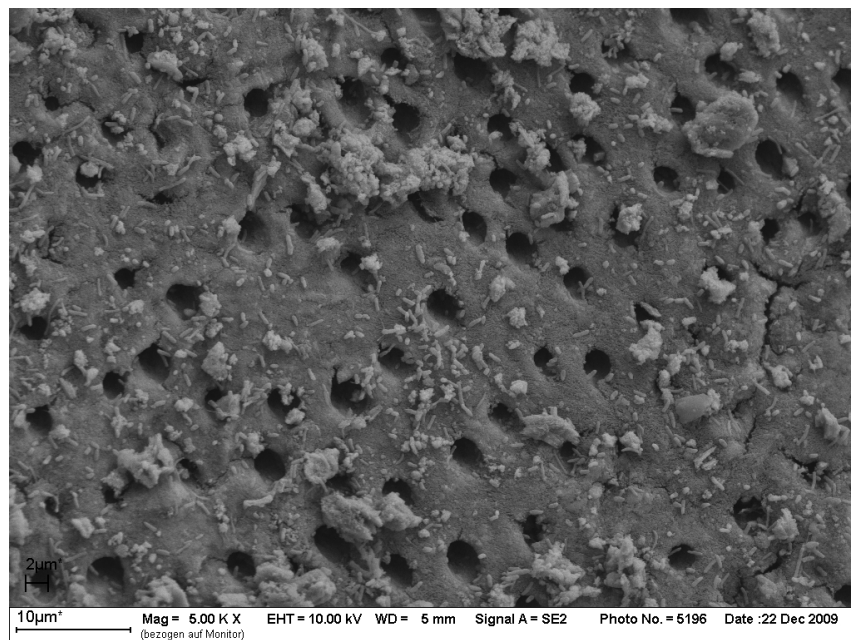


Abbildung 5.12: *Dentinoberfläche nach Exkavation mit dem PolyBur und Biosolv bei 5000facher Vergrößerung: Die Dentintubuli sind frei von Schmierschicht und Smear Plugs*

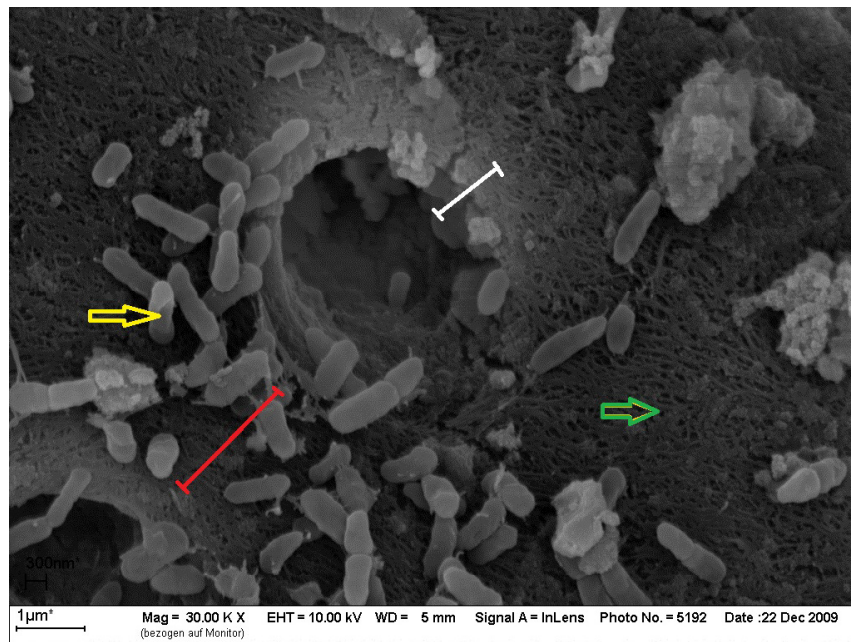


Abbildung 5.13: Dentintubuli nach Exkavation mit Polymerbohrer und Biosolv (30.000fach vergrößert). Weiße Markierung: peritubuläres Dentin; rote Markierung: intertubuläres Dentin; grüner Pfeil: deutlich sichtbare Kollagenfasern; gelber Pfeil: einige Bakterien

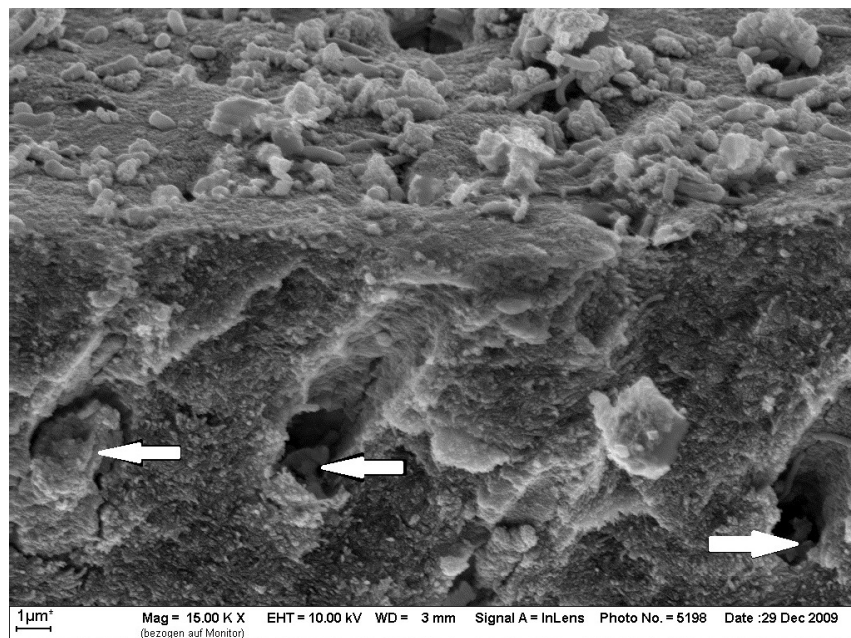


Abbildung 5.14: Kavität und Bruchstelle nach Exkavation mit Polymerbohrer und Biosolv (15.000fach vergrößert). Weiße Pfeile: Schräg gebrochene Tubuli mit Smear Plugs

5.3.5 Dentinkavitäten nach Exkavation mit dem Polymerbohrer und Carisolv

Auch nach Exkavation mit dem Polymerbohrer in Kombination mit Carisolv war die Dentinoberfläche nicht mit einer Schmierschicht bedeckt. Diese Beobachtung stützt die Aussage, dass das in Carisolv enthaltene Natriumhypochlorit die Schmierschicht auflöst. Auf den Aufnahmen sind allerdings in den Dentintubuli Reste von Smear Plugs zu erkennen (Abb. 5.15 bis 5.17).

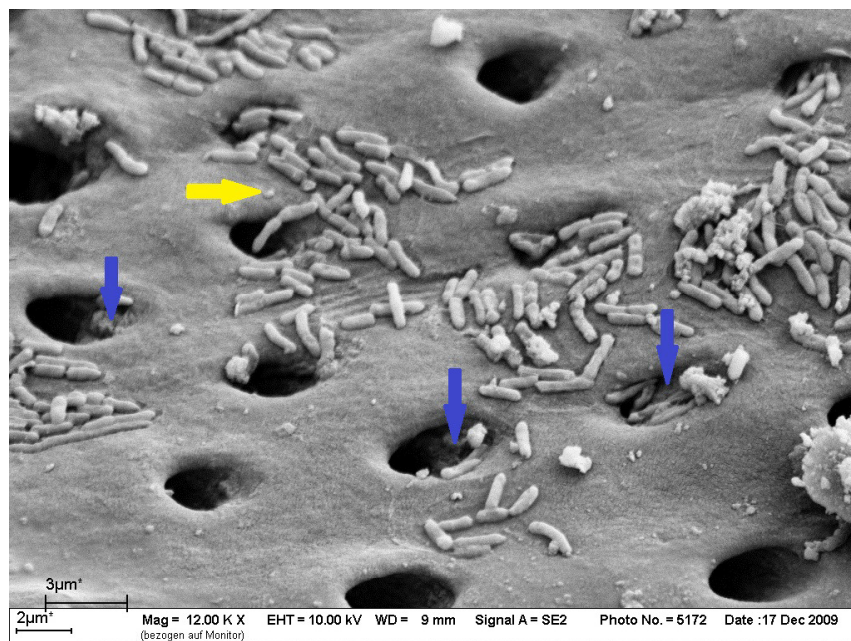


Abbildung 5.15: Kavität nach Exkavation mit Polymerbohrer und Carisolv (12.000fach vergrößert). Blaue Pfeile: Reste von Smear Plugs; gelber Pfeil: Bakterien

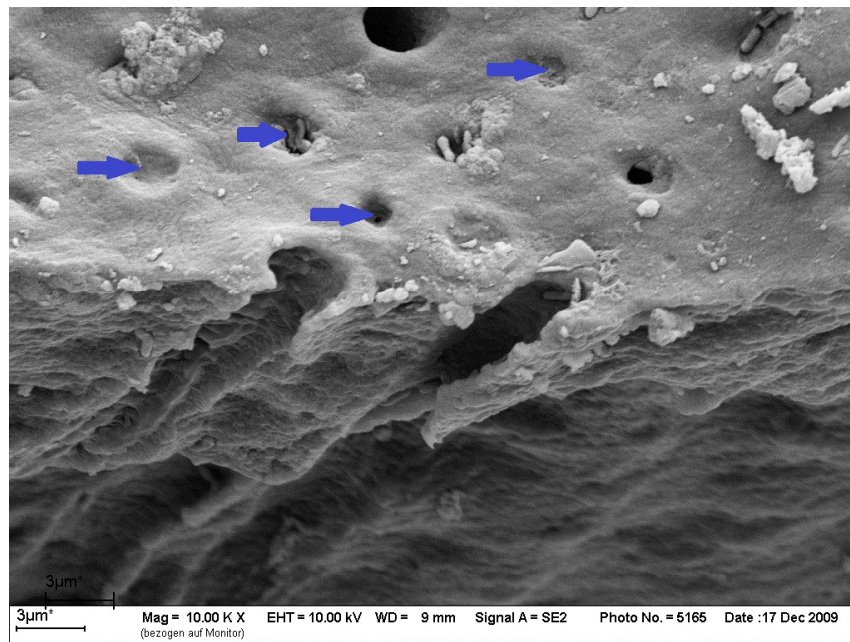


Abbildung 5.16: Kavität und Bruchstelle nach Exkavation mit Polymerbohrer und Carisolv (10-000fach vergrößert). Blaue Pfeile: Smear Plugs

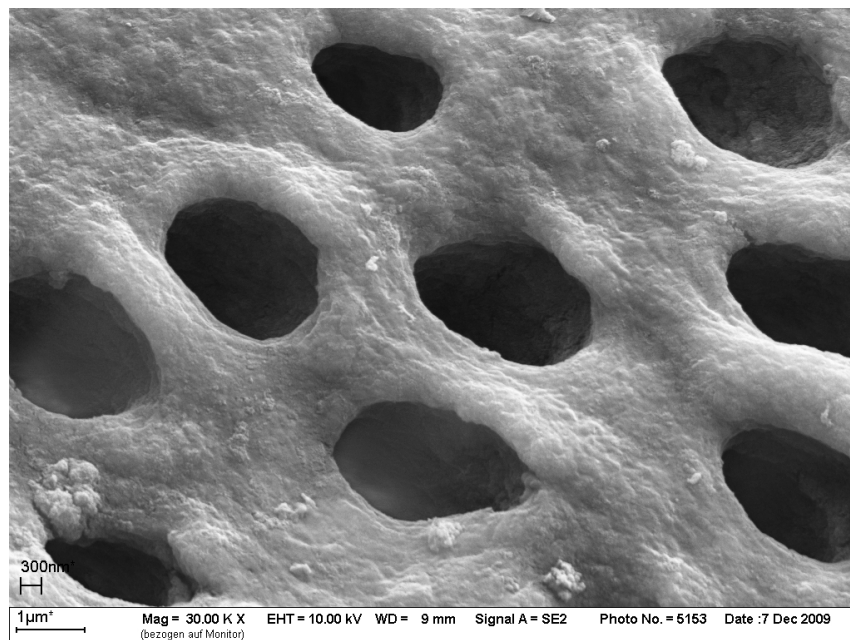


Abbildung 5.17: Kavität nach Exkavation mit Polymerbohrer und Carisolv (30.000fach vergrößert). Weder eine Oberflächenstruktur noch Bakterien sind erkennbar.

5.3.6 Vergleich der Dentinkavitäten nach Exkavation mit dem Polymerbohrer und Carisolv sowie mit dem Polymerbohrer und Biosolv

Die vergleichende Untersuchung zeigt, dass die Kavitätenoberfläche nach Exkavation mit dem Polymerbohrer und Carisolv weniger stark bakteriell besiedelt und auch glatter erscheinen als bei Exkavation mit dem Polymerbohrer und Biosolv. Der Grund: Während Biosolv eine chemisch saure Wirkung entfaltet und so etwas gesundes Hydroxylapatit entfernt, greift Carisolv das Hydroxylapatit nicht an, sondern entfernt nur Kollagen. Somit ist hier keine Oberflächenstruktur sichtbar (Abb. 5.18).

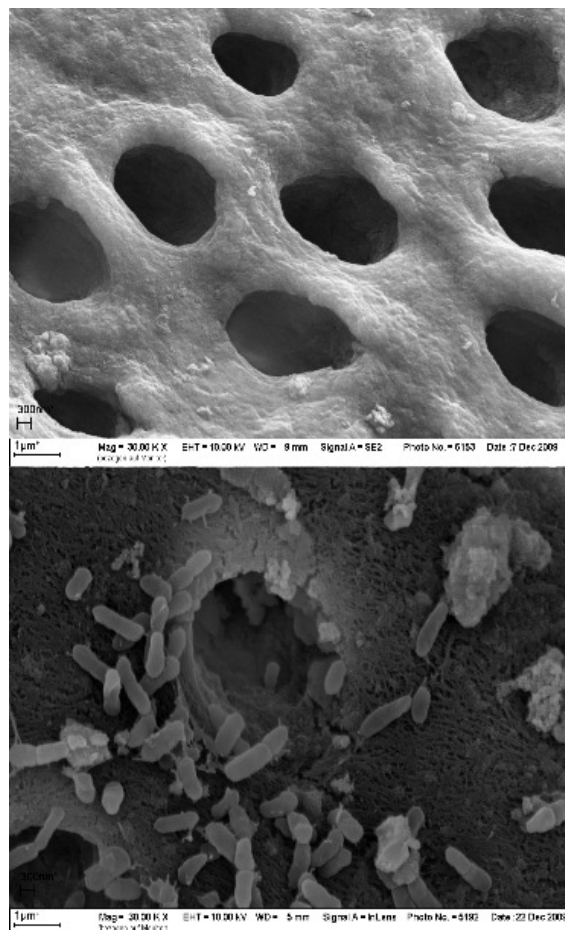


Abbildung 5.18: Oben: Kavität nach Exkavation mit Polymerbohrer und Carisolv; unten: Kavität nach Exkavation mit Polymerbohrer und Biosolv (jeweils 30.000fach vergrößert)

5.3.7 Dentinkavitäten nach Exkavation mit dem Polymerbohrer und DBA-Infiltration

Nach Exkavation mittels Polymerbohrer und Infiltration mit dem Dentin-Bonding-Agent Clearfil SE sind deutlich drei verschiedene Oberflächenstrukturen zu unterscheiden; das Adhäsiv setzt sich optisch deutlich von der Schmierschicht ab und erscheint im Bild heller sowie stärker strukturiert (Abb. 5.19)

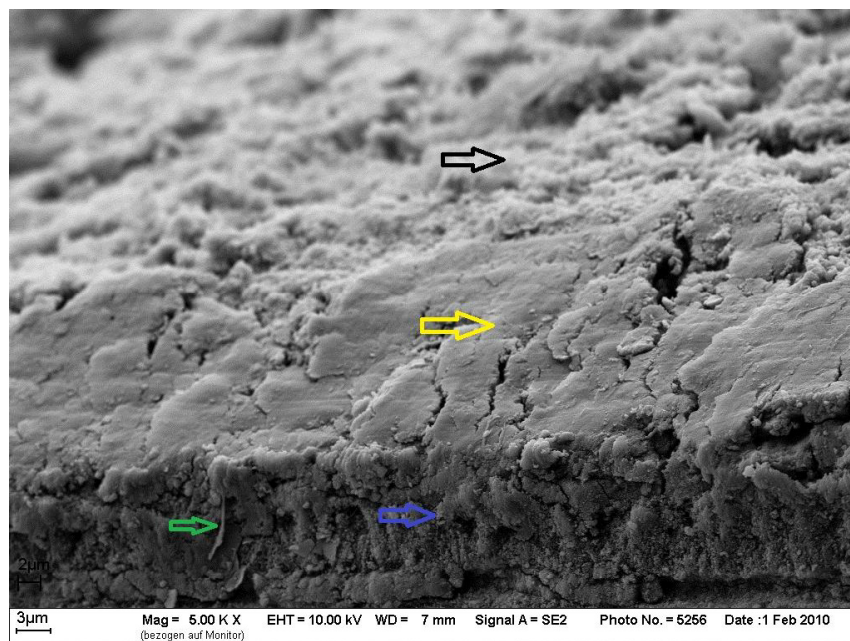


Abbildung 5.19: Kavität nach Exkavation mit dem Polymerbohrer und Infiltration mit Clearfil SE (1.000fach vergrößert): Es sind drei verschiedene Oberflächenstrukturen sichtbar. Schwarzer Pfeil: exkavierte Oberfläche der Kavität mit Dentinadhäsiv; gelber Pfeil: verdichtete Schmierschicht; blauer Pfeil: Bruchfläche

5.3.8 Dentinkavitäten nach Exkavation mit dem Polymerbohrer und Carisolv sowie DBA-Infiltration

Nach Exkavation mittels Polymerbohrer und Carisolv, Aufbringen des Bonding-Agent Clearfil SE und anschließendem Bruch der Zahnprobe lassen sich anhand von Struktur und Farbe deutlich zwei verschiedene Oberflächenstrukturen unterscheiden (Abb. 5.20).

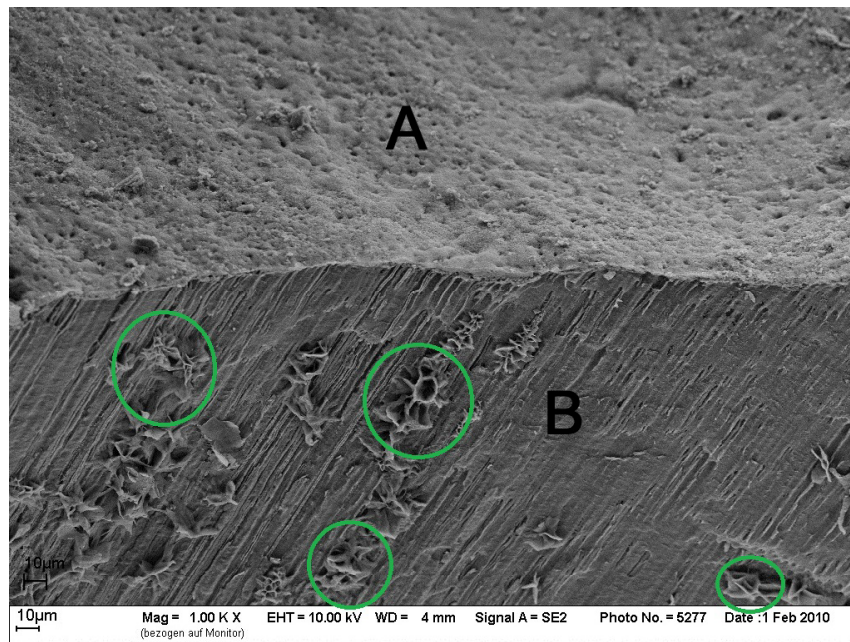


Abbildung 5.20: Kavität nach Exkavation mit dem Polymerbohrer und Carisolv sowie Infiltration mit Clearfil SE (1.000fach vergrößert). A: die exkavierte Oberfläche der Kavität, die deutlich das Dentinadhäsiv erkennen lässt. B: vermutlich durch die mechanische Belastung beim Bruch deformiertes Material (Zahn oder Dentinadhäsiv).

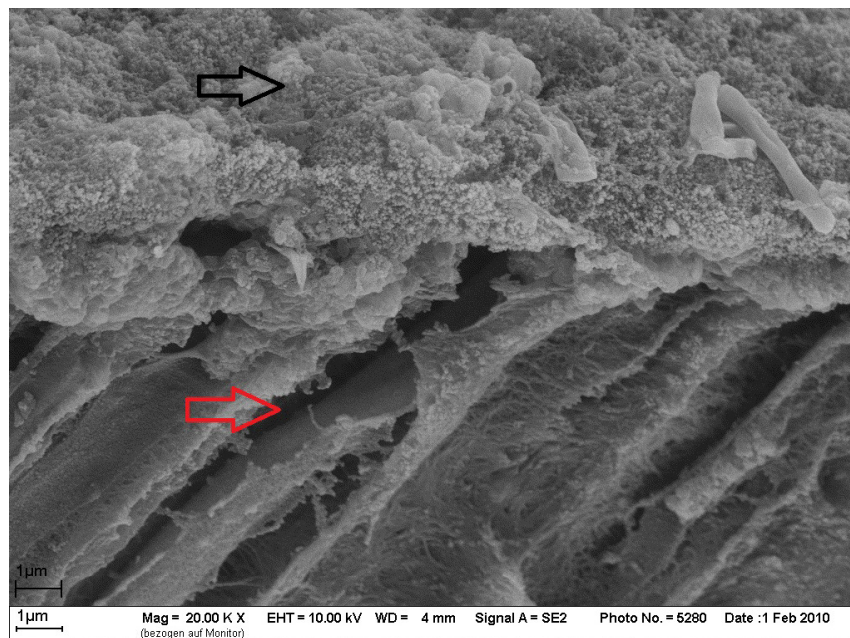


Abbildung 5.21: Kavität, exkaviert mit dem Polymerbohrer und Carisolv und behandelt mit Clearfil SE (20.000fache Vergrößerung). Schwarzer Pfeil: Oberflächenstruktur der Kavität mit Dentinadhäsiv; roter Pfeil: Kunststoff-Tag

5.3.9 Dentinkavitäten nach Exkavation mit dem Polymerbohrer und Biosolv sowie DBA-Infiltration

Nach Exkavation mittels Polymerbohrer und Biosolv, Aufbringen des Bonding-Agent Clearfil SE und anschließendem Bruch der Zahnproben lassen sich bei der mikroskopischen Untersuchung drei Oberflächenstrukturen unterscheiden: erstens die exkavierte Oberfläche der Kavität mit dem Adhäsiv, zweitens die Hybridschicht, welche sich optisch homogener darstellt, und drittens die mit Adhäsiv infiltrierten Dentintubuli, in denen sich die durch den Bruch freigelegte Monomerstruktur bzw. Kunststoff-Tags zeigen (Abb. 5.22).

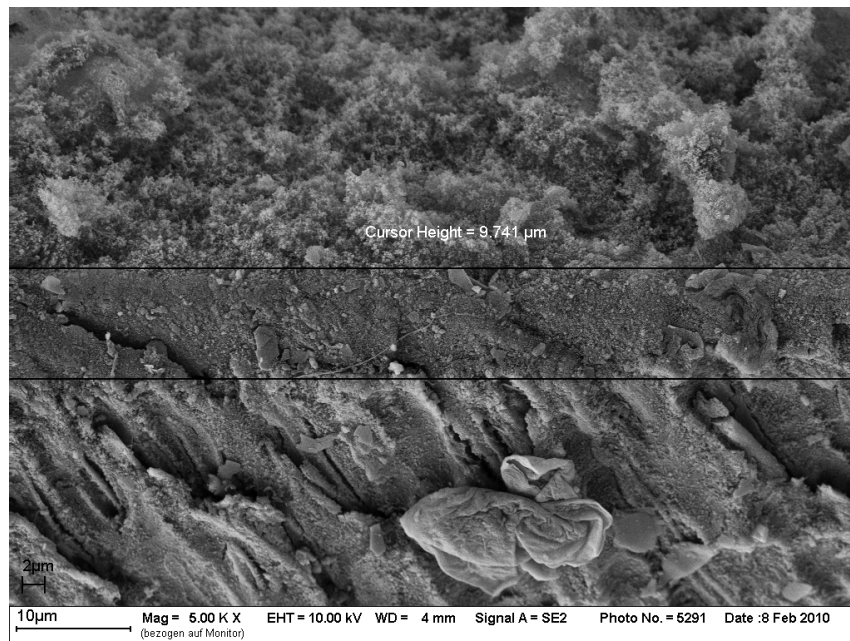


Abbildung 5.22: Kavität nach Exkavation mit dem Polymerbohrer und Biosolv sowie Infiltration mit dem DBA Clearfil SE infiltriert bei (1000fache) Vergrößerung. Oben: Oberfläche der Kavität mit Dentineadhäsiv; Mitte: Schmierschicht; Eindringtiefe von ca. 10 µm (zwischen den beiden Linien); unten: Mit Adhäsiv infiltrierte Dentintubuli

5.4 Ergebnisse Haftzugversuch

In diesem Versuch war nun die Haftfähigkeit der Proben vor Exkavation sowie nach Anwendung der unterschiedlichen Exkavationsmethoden zu

analysieren. Dafür waren fünf Gruppen gebildet worden:

1. Polymerbohrer (Polybur, Gebr. Brasseler/Komet, Lemgo/Deutschland)
2. Polymerbohrer und Biosolv (SFC 3, 3M ESPE AG)
3. Polymerbohrer und Carisolv (Medi Team, Sweden)
4. Hartmetall-Rosenbohrer (Gebr. Brasseler/Komet, Lemgo/Deutschland)
5. Gesundes Dentin

Nach Versuchsdurchführung unter gleichen Bedingungen ergab die Auswertung per Post-hoc-Test (Tukey-B) keinen statistisch signifikanten Unterschied zwischen den Gruppen ($p > 0,05$): In der Gruppe Polymerbohrer plus Carisolv lag die Haftfestigkeit bei 18,12 MPa, in der Gruppe Polymerbohrer bei 19,3 MPa, in der Gruppe Polymerbohrer plus Biosolv bei 22,1 MPa, in der Gruppe Hartmetallbohrer bei 22,7 MPa und in der Gruppe gesundes Dentin bei 23,0 MPa. In der Gruppe Polymerbohrer streuten die Ergebnisse am stärksten; bei zusätzlicher Anwendung von Carisolv bzw. Biosolv reduzierte sich die Streuung.

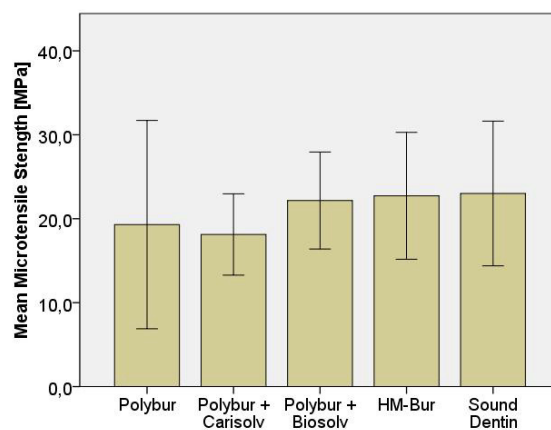


Tabelle 5.4: SPSS-Auswertung der Haftfestigkeit (Post-hoc Test/Tukey-B): $p > 0,05$. Es zeigt sich ein statistisch signifikanter Unterschied zwischen selbstlimitierenden Methoden und Hartmetallbohrer

| Gruppen | Polybur | Polybur + Carisolv | Polybur + Biosolv | HMB | gesundes Dentin |
|--------------------|---------|--------------------|-------------------|-------|-----------------|
| Mittelwert | 19,30 | 18,12 | 22,16 | 22,73 | 23,00 |
| Standardabweichung | 8,61 | 4,74 | 5,66 | 7,41 | 8,44 |

Tabelle 5.5: SPSS-Auswertung (*Post-hoc Test / Tukey-B*); Angaben in MPa. Es zeigt sich ein signifikanter Unterschied zwischen selbstlimitierenden Methoden und Hartmetallbohrer bzgl. Eindringtiefe in die Dentinkaries.

Kapitel 6

Diskussion

6.1 Erläuterungen zu Material und Methode

6.1.1 Übergreifende Punkte

6.1.1.1 Auswahl der Proben

In dieser Studie wurden extrahierte kariöse menschliche Zähne der zweiten Dentition verwendet. Für die Probenerstellung besonders geeignet waren Molaren mit einer weichen und tiefen Dentinkaries. Diese musste so groß sein, dass Proben für alle definierten Probengruppen erstellt werden konnten, da die Invasivität jeder Exkavationsmethode an genau derselben kariösen Stelle verglichen werden sollte.

6.1.1.2 Test neuer Methoden

In allen selbstlimitierenden Verfahren wurde mit dem Polymerbohrer exkaviert, da diese neu entwickelte Methode mehrere Vorteile versprach:

- Sie gewährleistet eine schonende Kariesentfernung mit einem rotierenden Instrument bei einheitlicher Umdrehungszahl von ca. 1.000 U/min.

- Der Polymerbohrer ist härter als kariöses Dentin, aber weicher als gesundes Dentin; somit war anzunehmen, dass das Instrument in der Lage sein müsste, zwischen gesundem und kariösem Dentin zu unterscheiden und nur die erkrankte Zahnschubstanz zu entfernen (Damaschke, 2005). Bei Auftreffen auf gesundes Dentin sollten sich die Schneiden abnutzen.
- Die Verwendung rotierender Instrumente im Anschluss an die biochemischen bzw. chemomechanischen Verfahren spart Zeit. Bislang wird bei Anwendung von Biosolv und Carisolv (Maze Tip + Bürstchen) das gelöste Dentin mit Handinstrumenten entfernt. In früheren Studien wurden diese Verfahren daher als zeitaufwändig kritisiert (Flückiger et al., 2005; Zinck et al., 1988; Banerjee et al., 2000; Damaschke, 2001; Damaschke et al., 2001).

Als potenzieller Nachteil des Polymerbohrers galt bislang die sich bildende Schmierschicht. Laut den Untersuchungen dieser Studie entfällt sie jedoch, wenn das Instrument in Kombination mit chemomechanischen bzw. biochemischen Verfahren eingesetzt wird. Damit sollten Dentinadhäsive tief in die Kollagenstrukturen eindringen können, wie Imazato schon feststellte (Imazato et al., 2002). In der Ausgangshypothese ließ dies vergleichbar gute Bedingungen für das Einbringen von Füllungen erwarten wie beim konventionellen Vorgehen.

6.1.2 Diskussion des Vorgehens beim Lagerschlitten-Versuch

In diesem Versuch wurde zum ersten Mal an genau der gleichen kariösen Stelle der Unterschied zwischen Polymerbohrer und Stahlbohrer untersucht. Der Endpunkt der Exkavation wurde nicht subjektiv durch den Behandler bestimmt, sondern objektiv durch die Technik des Lagerschlitten-Bohrsystems.

6.1.2.1 Einsatz des Lagerschlittens

Der Einsatz des Lagerschlitten-Bohrsystems war im Kontext dieser Studie essenziell, um bei der Exkavation mit den unterschiedlichen Methoden jeweils ein exakt gleiches und objektives Vorgehen sicherzustellen. Insbesondere galt es, den therapeutischen Endpunkt mittels der Technik objektiv zu ermitteln. Ohne eine solche Vorrichtung entscheidet der Behandler nach subjektiven Kriterien; dies war hier auszuschließen.

Ein absolutes Limit bei Einsatz des Hartmetallbohrers ergibt sich allerdings in jedem Fall aus der Konstruktion: Der Endpunkt ist spätestens dann erreicht, wenn der Bohrer so weit eingedrungen ist, dass der Schaft Kontakt zur Probe hat. Daraus lässt sich schließen, dass die gemessenen Unterschiede im klinischen Fall noch größer sein könnten.



Abbildung 6.1: *Endpunkt des Bohrers: der Schaft hat Kontakt zur Probe*

6.1.2.2 Konstruktion des Lagerschlittens

Das Lagerschlitten-Bohrsystem wurde von der Fa. Syndicad für diesen Versuch entwickelt und konstruiert. Vorbild war der Luftlagerschlitten der Firma Komet / Gebr. Brasseler (Standort: Lemgo). Das Grundprinzip

der Konstruktion sind zwei miteinander verbundene, parallel zueinander zu positionierte Gleitlager, entlang derer der Probenhalter mit Probe auf den Bohrer zubewegt wird. Um den sogenannten Slip-Stick-Effekt zu vermeiden, sollte die Haftreibung nicht größer sein als die Gleitreibung. Derzeit sind die Gleitlager aus Stahl; um den Reibungskoeffizienten weiter zu verringern, könnte dieser auch mit Messing, Lagerbronze oder Teflon gepaart werden.

Ein am Schlitten über eine Umlenkrolle befestigtes Gewicht von 150 g gewährleistet eine definierte Vorschubkraft von ca. 1,5 N. In früheren Versuchen mit dem Luftlagerschlitten der Firma Komet / Gebr. Brasseler arbeitete man mit 200 g Gewicht. Bei jenem Versuchsaufbau wurden jedoch Diamantschleifkörper sowie spezielle Schleifkörper für die Bearbeitung von Zirkonoxidkeramik (Vickershärte 1200 HV) mit Hilfe des roten Winkelstücks untersucht (Klasnic, 2010). Durch die Federkraft des am Schlitten angesetzten Mikrometers wird die Losbrechkraft des Schlittens in etwa egalisiert.

Im Vergleich beider Konstruktionen liegen die Vorteile des Luftlagerschlittens in der völligen Reibungsfreiheit des Luftlagers. Im Unterschied dazu hat die hier verwendete Vorrichtung aufgrund der Kugellager eine geringe Haftreibung. Ein weiterer Nachteil zeigte sich während des Versuchs: Die durch das Bohren verursachten Vibrationen ließen keine dauerhaft exakte Positionierung des Winkelstücks zu. Besser wäre eine Spannvorrichtung, die der Form des Winkelstücks angepasst ist und an mehreren Positionen des Bohrers fixiert werden kann. Im Luftlagerschlitten der Firma Komet hingegen waren zur Dämpfung der Schwingungen des Winkelstücks Gummipuffer verwendet worden (Klasnic, 2010).

Ein klarer Vorteil der hier verwendeten Konstruktion sind die geringeren Anschaffungskosten. Der Lagerschlitten steht nun dauerhaft auch für andere Versuche vor Ort zu Verfügung.

6.1.2.3 Vorbereitung der Proben

Die Methode zur Probenvorbereitung wurde erst entwickelt, nachdem das Lagerschlitten-Bohrsystem fertig konstruiert war.

Zu Anfang wurden ganze Zähne in den Probenaufnehmer des Schlittens eingebracht. Dies hatte den Nachteil, dass der Bohrer mit nicht-kariösen Arealen in Kontakt kam; als Folge konnte die Eindringtiefe in das kariöse Dentin nicht präzise bewertet werden. Daraufhin wurde die Probenvorbereitung überdacht und verbessert. Die Proben wurden nun in 2 mm dicke Scheiben geschnitten, sodass die Schneide des Bohrerkopfes rechtwinklig auf die entstehende, 2 mm breite kariöse Fläche auftreffen konnte. Auf dieser Weise war es möglich, die Eindringtiefe exakt zu messen und vor allem zwischen den verschiedenen Exkavationsmethoden zu vergleichen. Jede Gruppe wurde mit der gleichen Karies beurteilt und verglichen.

6.1.3 Diskussion des Vorgehens beim μ CT-Versuch

Nach Einbettung der Proben in Komposit auf einem eigens angefertigten Probenteller wurden sie im modifizierten μ CT-Halter in eine exakte Position gebracht. So konnte eine gute mechanische Positionierung sichergestellt werden, die durch die Exkavation nicht verändert wurde. Die Modifikation des μ CT-Halters war notwendig, um die Proben inklusive Probenhalter mehrmals in einer definierten Position repositionieren und mit dem μ CT scannen zu können.

Durch Überlagerung der einzelnen 3D-Scans war aufzuzeigen, wie viel Substanzabtrag durch die verschiedenen Exkavationsmethoden verursacht wurde. Da sich diese Differenzen im μ m-Bereich bewegen würden (Tsolmon, 2008), musste die Konstruktion diesen Anforderungen entsprechen. Das Überlagerungsergebnis wurde unter ImageJ mittels *rigid registration* (nach Prof. Dr. Peter Rösch, Augsburg) verbessert (Chiang et al., 2010) und anschließend durch Subtraktion der Bilder, die Differenz quantitativ bestimmt. Die Proben wurden bei 1000 U/min durch denselben Behandler nach visuellen Kriterien exkaviert.

6.1.4 Diskussion des Vorgehens beim Rasterelektronenmikroskop-Versuch

Die Proben für den Rasterelektronenversuch wurden nicht nur mit der aufsteigenden Alkoholreihe getrocknet, sondern zusätzlich unter Einsatz des Kritisch-Punkt-Trockners dehydriert. Wegen der Schrumpfung kam es dabei in manchen Proben zu Spannungsbrüchen, wie in anderen Studien bereits beschrieben (Efflandt et al., 2002). Ungeachtet dessen zeigte sich dies als effektives Verfahren, um während der Trocknung feinste Strukturen zu erhalten.

6.1.5 Diskussion des Vorgehens beim Haftzugversuch

6.1.5.1 Prinzip des Mikrozugversuchs

Die Haftung zwischen Dentin und Füllung ist ein wichtiges Qualitätsmerkmal in der konservierenden Zahnheilkunde. Sie wird meist bei gesundem Dentin gemessen. Bei kariösem Dentin entsteht das Problem der Haftungsstreuung; so dass hier nur der Mikrozugversuch angewendet werden kann. Dies war im vorliegenden Versuch der Fall, da hier kariöses Dentin verwendet werden musste.

Der Mikrozugversuch ist eine Weiterentwicklung des früheren Zugversuches (Sano et al., 1994): Bei der Messung werden Mittelwert und Streuung der Haftung für einen Zahn ermittelt. So lässt sich der Einfluss von veränderten Dentinstrukturen auf die Verbundfestigkeit ableiten (Pashley et al., 1995).

6.1.5.2 Vorbereitung der Proben

Ganze Zähne wurden der Länge nach in 1 mm x 1 mm dicke Stäbchen geschnitten, da kleinere Verbundflächen die Anzahl der Frakturen während der Messungen reduzieren (Sano et al., 1994; Phrukkanon et al., 1998). Da hier mit selbstlimitierenden Exkavationsmethoden gearbeitet wurde

und folglich das Dentinadhäsiv und das Füllungsmaterial auf demineralisiertem Dentin befestigt werden musste, war es wichtig, die Verbundfestigkeit auch mit gesundem Dentin zu vergleichen. Somit wurde eine weitere Versuchsgruppe gesundes Dentin gebildet, um eine signifikante Streuung erkennen zu können (Neves et al., 2011b).

6.2 Diskussion der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Studie unterstützen die Ausgangshypothese, dass speziell bei der Kariesentfernung im Dentin die neuen, schonenderen Methoden eine ernstzunehmende Alternative zum konventionellen Exkavieren mittels Hartmetallbohrer darstellen.

Die Nachteile des konventionellen Vorgehens wurden bereits eingangs geschildert: Der therapeutische Endpunkt ist abhängig von der subjektiven Einschätzung des Zahnarztes, basierend auf einer Taktilitätsprüfung. Da Metallbohrer problemlos auch gesundes Dentin abtragen können, wird häufig überexkaviert – damit birgt dieses Vorgehen ein erhöhtes Risiko der Pulpaeröffnung (Kunzelmann, 2011). Besonders hoch ist dieses Risiko bei jungen Patienten, da bei diesen das Dentin oft so weich ist, dass die Sondenkontrolle keinen zuverlässigen Endpunkt ergibt.

Trotz dieser Nachteile wird Patienten bislang nur selten eine Alternative zur konventionellen Exkavation angeboten. Dies, obgleich klinische Studien ergeben haben, dass 70 Prozent der Patienten die Behandlung mit dem Polymerinstrument (ohne Anästhesie) der Behandlung mit dem Hartmetallbohrer vorziehen (Allen et al., 2005) – vermutlich, weil diese selbstlimitierenden Methoden weniger schmerzhaft sind. (Bergmann et al., 2005; Balciuniene et al., 2005; Beeley et al., 2001; Schwendicke et al., 2015). Ein Grund hierfür ist, dass der PolyBur in der Zone der Sklerose endet. Dort sind die Dentinkanälchen obliteriert und es wird kein direkter Reiz an den Nerv weitergeleitet. Häufig wird die Präferenz für das konventionelle Vorgehen mit der Kostenersparnis für den Patienten begründet – doch dieses Argument greift nicht mehr, wenn man

das Risiko einer Wurzelbehandlung und die resultierende prothetische Versorgung mit berücksichtigt.

Die erheblichen Vorteile der selbstlimitierenden Verfahren konnten in dieser Studie erneut belegt werden: Der therapeutische Endpunkt wird hier durch physikalische Gegebenheiten – und damit nach objektiven Kriterien – bestimmt und ergibt in jedem einzelnen Fall einen deutlich und messbar geringeren Substanzabtrag. Die erhaltene Substanz ist durchgehend remineralisierbar und damit erhaltenswert, und sie bietet eine gute Grundlage für die anschließende Versorgung der Kavitäten mit Füllungen.

Angesichts dieser Ergebnisse, die im Folgenden detaillierter diskutiert werden, sollte die Zahnmedizin selbstlimitierende Methoden für eine Kariesentfernung in Betracht ziehen, um wertvolle Zahnhartsubstanz zu erhalten.

6.2.1 Diskussion der Ergebnisse des Lagerschlitten-Versuchs

Wie die Studie ergab, können im Durchschnitt mindestens 0,75 mm Zahnhartsubstanz durch selbstlimitierende Therapien erhalten werden. Ähnliche Werte wurden von Tsolmon bereits dokumentiert (Tsolmon, 2008). Im Umkehrschluss heißt dies, dass bei der Entfernung von Dentinkaries nach neuen Kriterien mit dem Hartmetallbohrer 0,75 mm Dentin überexkaviert wurden. Dies bestätigen auch frühere Studien (Celiberti et al., 2006; Dammaschke et al., 2008).

Sofern die erhaltenen Dentinstrukturen remineralisierbar sind – solange also Bestandteile davon noch Hydroxylapatit-Kristallisationskeime enthalten –, ist ihre Erhaltung von hoher Bedeutung für die nachhaltige Versorgung. Im pulpanahen Dentin, dem Hauptindikationsgebiet selbstlimitierender Verfahren, können 0,75 mm mehr oder weniger Abtrag über eine Pulpaperforation entscheiden. Durch Schonung der Pulpa kann hier eine Wurzelbehandlung vermieden werden.

6.2.2 Diskussion der Ergebnisse des μ CT -Versuchs

In der Untersuchung mit dem μ CT 40 konnte für die selbstlimitierenden Methoden ein Substanzerhalt von durchschnittlich 300-500 μ m nachgewiesen werden, verglichen mit der Exkavation mittels Hartmetallbohrer. Tsolmon konnte ungefähr 900 μ m Substanzerhalt nachweisen. Das könnte daran liegen, dass der Abtrag von bioschemisch oder chemo-mechanisch gelöstem Gewebe mit dem neu entwickelten PolyBur höher ist als mit Handinstrumenten, aber auch höher als mit dem Vorgänger Smartprep.

Im Vergleich zum Lagerschlittenversuch ergab der μ CT-Versuch einen geringeren Substanzerhalt. Grund dürfte sein, dass die Grenze von gesundem zu kariösem Gewebe hier anhand der Grauwerte des Dentins definiert wurde, was eine feinere Differenzierung zulässt. Größere Unterschiede in der Gruppe Stahlbohrer (0,75 mm) sind vermutlich darin begründet, dass es im Lagerschlittenversuch infolge des angehängten Gewichts zu einer Übertherapie kam, während im μ CT -Versuch von Hand und womöglich zögerlicher exkaviert wurde. Hinzu kommt der Faktor der statistischen Auswertung: Da im μ CT -Versuch relativ viele Kavitätenanteile mit geringerer Schichtstärke im Randbereich vorlagen, wurde der Mittelwert von geringeren Unterschieden beeinflusst und gibt somit ein eher konservatives Maß wieder.

Die Analyse der Mineraleichte des erhaltenen Gewebes ergab für die Gruppe Polymerbohrer 1,97 g/cm³, für die Gruppe Polymerbohrer plus Biosolv 1,77 g/cm³ und für die Gruppe Polymerbohrer plus Carisolv 1,65 g/cm³. Diese Werte entsprechen denen von gesundem Dentin, wie in einer Studie von Neves beschrieben: Sie ermittelte mit dem μ CT für Schmelz, Dentin und kariöse verändertes Dentin Mineraleichtewerte von 2,89, 1,74 und 0,27 g/cm³ (Neves et al., 2011b). Auch Willmotts Messungen ergaben ähnliche Mineralkonzentrationen für Dentin und kariöses Dentin (1,42; 0,37-0,5 g/cm³) (Willmott et al., 2007).

Clementino-Luedemann hat in ihren Studien festgestellt, dass der Bereich, der nach Exkavation durch Biosolv zurückblieb, einen Minerali-

sationsgrad von 0,90 g/cm³ aufwies; bei Carisolv waren es 0,85 g/cm³. Diese Werte sind jedoch mit den hier ermittelten Werten nicht vergleichbar, da dort ein μ CT 20 mit maximal 40 kV Beschleunigungsgang verwendet worden war.

In Summe zeigt sich, dass bei Exkavation mit dem Hartmetallbohrer remineralisierbares und somit erhaltenswertes Gewebe in erheblichem Ausmaß entfernt worden war.

6.2.3 Diskussion der Ergebnisse des Rasterelektronenmikroskop -Versuchs

Der Versuch bestätigte die vorliegenden wissenschaftlichen Erkenntnisse zur Oberflächenbeschaffenheit des Dentins nach Durchführung verschiedener Exkavationsmethoden (Clementino-Luedemann et al., 2006; Ahmed et al., 2008; Tsolmon, 2008): Die Oberfläche chemomechanisch und biochemisch behandelter Kavitäten wies keine Schmierschicht auf; die Exkavation mit dem Hartmetallbohrer hinterließ eine dünnere, aber dafür dichtere Schmierschicht als die Behandlung mit dem Polymerbohrer. Bei Anwendung von Biosolv führt der Säuregehalt des Präparats zur Entfernung der Schmierschicht (Ahmed et al., 2008).

In allen Gruppen waren Bakterien auf der Oberfläche der exkavierten Kavitäten zu erkennen. Dies könnte theoretisch auch durch Kontamination der Proben während der Lagerung in Wasser (nach der Exkavation) entstanden sein. Aktuellere Studien zeigen allerdings einen ähnlich hohen Bakterienbefall von Kavitäten vor und nach Exkavation mittels Hartmetallbohrer und mittels Polymerbohrer (Isik et al., 2010). Daraus lässt sich schließen, dass die Lagerung der Proben hier nicht die einzige Ursache war und dass Bakterienbefall generell durch Exkavation nicht restlos entfernt werden kann. Folglich empfiehlt es sich, vor Anwendung eines Adhäsivs die Kavität mit Chlorhexidin digluconat oder Carisolv (das Natriumhypochlorid enthält) zu desinfizieren. Auch Glutaraldehyd, das sich in Dentinadhäsiven wie Syntac Classic befindet, reduziert die Bakterienlast (Schmidlin et al., 2004; Hamama et al., 2014).

Das verwendete Dentinadhäsiv Clearfil SE, das als Klassiker unter den Self-Etch-Systemen gilt, zählt mit einem pH-Wert von rund 2 zu den weniger aggressiven Adhäsivsystemen. Da solche milderer Adhäsive die vom Metall- oder Polymerbohrer hinterlassene Schmierschicht nicht völlig entfernen, können Smear Plugs und Schmierschichtanteile verbleiben. Somit war interessant zu sehen, welche Oberflächenbedingungen das Adhäsiv hinterlassen würde. Der Versuch ergab, dass Clearfil SE sämtliche Schmierschichten durchdringen konnte, und bestätigte insofern die Erkenntnis aus früheren Studien, wonach Adhäsive in unexkaviertes, kariöses Dentin bis zur gesunden Dentinstruktur vorzudringen vermögen (Hahn and Hellwig, 2004). In der Gruppe Polymerbohrer plus Biosolv konnte eine Hybridschicht mit einer Eindringtiefe von ca. 10 μm nachgewiesen werden.

Laut Imazato sind Dentinadhäsive sogar in der Lage, bis weit in die Kollagenstruktur einzudringen (Imazato et al., 2002). Somit wären die Kollagenfasern versiegelt und eventuell zurückbleibende Bakterien immobilisiert (Kidd, 2004). Da diese Versiegelung auch die Remineralisierung kariös veränderter Dentinstrukturen verhindert, sollte zunächst in pulpanahem Dentin eine Unterfüllung mit Kalzium und Phosphationen appliziert werden, um das Wachstum der dort vorhandenen Hydroxylapatit-Kristallisationskeime zu fördern (Peters et al., 2010). Im Randbereich hingegen sollte mittels eines Dentinadhäsivs und eines bakteriendichten Füllungswerkstoffs die Kavität versorgt werden, um ein weiteres Eindringen von Bakterien zu vermeiden.

6.2.4 Diskussion der Ergebnisse Haftzugversuch

Die Haftzugwerte aller Gruppen wiesen keinen statistisch signifikanten Unterschied auf – und dies, obwohl auch hier das relativ milde Self-Etch-System Clearfil SE verwendet worden war. Die Beobachtung aus der elektronenmikroskopischen Untersuchung, dass Clearfil SE auch Schmierschichten durchdringen kann, wurde insofern bestätigt.

In den Gruppen Polymerbohrer plus Carisolv (18,12 MPa) sowie Polymer-

bohrer (19,3 MPa) zeigte sich ein im Durchschnitt geringere, aber nicht signifikant geringere Haftzugfestigkeit. Dies dürfte klinisch insofern keine wesentliche Rolle spielen, als bei pulpanaher Exkavation – dem Einsatzgebiet selbstlimitierender Methoden – die kariös veränderte Fläche in der Regel nur einen kleinen Anteil der Gesamtfläche ausmachen wird, an der die Füllung anzubringen ist. In früheren Mikrozugversuchen hatte Carisolv einen guten Haftzugverbund gezeigt (Burrow et al., 2003). In Tsolmons Mikrozugversuch hatte die Gruppe Biosolv (43,8 MPa) ebenfalls bessere Werte aufgewiesen als die Gruppe Carisolv (35,3 MPa) (Tsolmon, 2008).

Die Streuungswerte waren in der Gruppe Polymerbohrer alleine am höchsten, in den Gruppen Polymerbohrer plus Biosolv (22,1 MPa) sowie Polymerbohrer plus Carisolv (18,12 MPa) am niedrigsten. Grund für die größere Streuung in der Gruppe Polymerbohrer dürfte sein, dass bei Anwendung von Clearfil SE zwar die zurückbleibende Schmierschicht entfernt wurde, die Oberflächenstruktur aber anschließend weniger ausgeprägt erschien als bei Anwendung von Biosolv oder Carisolv. Ähnliches hatten auch frühere Studien schon gezeigt (Clementino-Luedemann et al., 2006; McInnes-Ledoux et al., 1987). Hier würde sich als Alternative die Verwendung eines Total-Etch-Systems anbieten, welches die Schmierschicht vollständig auflöst.

In der Gesamtschau lagen die Haftwerte aller Gruppen zwischen denen von nicht vollständig exkavierter Karies (30 MPa) und infiziertem kariösem Dentin (10 MPa) (Yoshiyama et al., 2002). Dass sie niedriger waren als in der o.g. Studie von Tsolmon, dürfte daran liegen, dass in den hier verwendeten Proben ausschließlich in pulpanahem Dentin exkaviert wurde. Neves hatte in ihrer Studie mit Self-Etch-Systemen niedrigere Haftwerte festgestellt, sowohl auf kariösem als auf gesundem Dentin. Dabei waren auch selbstlimitierende Methoden wie Kunststoffbohrer und Carisolv angewandt worden (Neves et al., 2011b). Auch Silva hatte in seiner Studie nach Exkavation von Dentinkaries mit Polymerbohrern schlechtere Haftwerte festgestellt (Silva et al., 2006). Grund für die höhere Haftzugfestigkeit in dieser Studie könnte sein, dass nach Anwendung sämt-

licher selbstlimitierender Verfahren die erhaltene Dentinstruktur einen vergleichbar hohen Mineralisationsgehalt aufwies wie gesundes Dentin.

Kapitel 7

Zusammenfassung

Die vorliegende Studie zeigt, dass selbstlimitierende Methoden ausschließlich kariöses Dentin entfernen und demineralisierte, remineralisierbare Dentinanteile schonen. Im Indikationsgebiet dieser Verfahren, der Exkavation in pulpanahem Dentin, kann vermutlich in vielen Fällen auf diese Weise eine iatrogene Pulpaperforation verhindert werden.

In einer Reihe von Versuchen wurden selbstlimitierende Therapien konkret: die Exkavation mittels eines Polymerbohrers der neuesten Generation, alleine und in Kombination mit biochemischen und chemomechanischen Verfahren (Biosolv und Carisolv) – dem konventionellen Hartmetallbohrer gegenübergestellt. Die Ergebnisse dieser Vergleiche und Analysen sollten dazu beitragen, selbstlimitierende Kariestherapien künftig als Alternative zum Hartmetallbohrer zu etablieren.

Im Lagerschlittenversuch wurden Zähne mit Dentinkaries in Scheiben geschnitten und so in Probengruppen unterteilt, dass jedes Verfahren an derselben kariösen Stelle ausgeführt werden konnte. Jede Probe wurde zuerst mit dem selbstlimitierenden Verfahren, dann mit dem Hartmetallbohrer exkaviert somit konnte erstmalig an genau derselben kariösen Stelle ein Vergleich zwischen Hartmetall- und Polymerbohrer (alleine wie auch in Kombination mit dem biochemischen und dem chemomechanischen Verfahren) gezogen werden. Da der Endpunkt der Exkavation nicht durch den Behandler, sondern durch die Technik des Lagerschlitten-

Bohrsystems bestimmt wurde, war ein exakt konsistentes Vorgehen sichergestellt. Der Versuch belegte, dass bei Anwendung selbstlimitierender Kariestherapien im Vergleich zum konventionellen Hartmetallbohrer etwa 680 μm bis 820 μm mehr Zahnhartsubstanz erhalten bleiben kann. Innerhalb der selbstlimitierenden Methoden war kein signifikanter Unterschied erkennbar.

Der μCT -Versuch ermöglichte weitergehende Aussagen zur Quantität und Qualität der erhaltenen Zahnschubstanz. Zur Vorbereitung wurden zunächst wie im Lagerschlittenversuch Proben hergestellt, die anschließend ebenfalls (allerdings manuell) zuerst mit selbstlimitierenden, dann im konventionellen Verfahren exkaviert wurden. Auch hier blieb mit selbstlimitierenden Verfahren mehr Gewebe erhalten, das anschließend mit dem μCT 40 analysiert wurde. Die 3D-Darstellung und Berechnung der Proben ergab, dass mit den drei selbstlimitierenden Methoden bis zu 500 μm mehr Zahnschubstanz erhalten blieben. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass bei der Entfernung von Dentinkaries mit dem Hartmetallbohrer ein entsprechendes Dentinvolumen überexkaviert wird.

Der Graustufenabgleich (anhand des linear attenuation coefficient. LAC) zeigte, dass das erhaltene Dentin mit 1,97 ,1,77 und 1,65 g/cm³ einen ähnlichen Mineralisationsgehalt aufwies wie gesundes Dentin. Ermittelt wurde der Grauwert direkt unter der Oberfläche der Kavität. Suboptimal war dabei, dass der therapeutische Endpunkt bei Verwendung des Stahlbohrers vom Behandler bestimmt wurde, so dass sich Anwenderfehler nicht komplett ausschließen lassen. Vorzuziehen wäre daher der Einsatz eines Lagerschlittensystems.

Insgesamt konnte in diesem Versuch somit nachgewiesen werden, dass mit selbstlimitierenden Methoden im Vergleich zum Hartmetallbohrer remineralisierbare Dentinschubstanz in signifikantem Umfang erhalten bleibt. Im Indikationsgebiet dieser Verfahren, der Exkavation in pulpanahem Dentin, kann ein Substanzerhalt im Umfang von 500 μm bereits darüber entscheiden, ob die Pulpa perforiert und somit eine Wurzelbehandlung notwendig wird.

Für den Rasterelektronenmikroskop-Versuch wurde zunächst mit den di-

versen genannten Verfahren Dentinkaries von kariösen Zähnen entfernt. Jeder Zahn wurde anschließend mit Stickstoff auf -196°C gefroren und an einer Sollbruchstelle im Zentrum der Kavität in zwei Teile geteilt. Die resultierenden Zahnproben wurden dann mittels einer aufsteigenden Alkoholreihe dehydriert und anschließend einer Kritisch-Punkt-Trocknung unterzogen. Die morphologische Betrachtung der Kavitäten zeigte in allen Probengruppen eine Besiedlung mit Stäbchenbakterien, je nach Stadium und Aktivitätsgrad der Karies. Dies entspricht auch den Erkenntnissen aus aktuelleren Studien, wonach bei Exkavation mittels Hartmetallbohrer sowie Polymerinstrument eine ähnliche bakterielle Belastung auftritt. In der Gruppe Polymerbohrer plus Carisolv wurde die Bakterienlast durch Anwenden von Natriumhypochlorid reduziert.

Sehr unterschiedlich war die verbleibende Schmierschicht: Der Hartmetall-Rosenbohrer hinterließ nach Exkavation eine gleichmäßige, dünne Schmierschicht, die sämtliche Dentintubuli-Öffnungen mit Smear Plugs verschloss. Der Polymerbohrer hinterließ eine dickere Schmierschicht, die jedoch im Unterschied zum Hartmetallbohrer deutlich Dentintubuli-Öffnungen zeigte. Nach Exkavation mittels Polymerbohrer in Kombination mit dem biochemischen Verfahren Biosolv war die Dentinoberfläche schmierschichtfrei, bedingt durch den sauren pH-Wert der Lösung von 1,5 (Ahmed et al., 2008). Auch die Dentintubuli waren freigängig. Nach Exkavation mittels Polymerbohrer in Kombination mit dem chemomechanischen Verfahren Carisolv (basisch) blieb ebenfalls keine Schmierschicht, jedoch waren in den Dentintubuli Reste von Smear Plugs zu erkennen. Somit bestätigte der Versuch die Erkenntnisse zur Oberflächenbeschaffenheit von Dentin nach den verschiedenen Exkavationsmethoden (Clementino-Luedemann et al., 2006; Ahmed et al., 2008; Tsolmon, 2008).

Am besten präpariert erschienen die Oberflächen nach Behandlung mit dem Polymerbohrer in Kombination mit dem biochemischen bzw. chemomechanischen Verfahren; die sonst für Polymerinstrumente typische Schmierschicht war hier nicht festzustellen. Dies legt den Schluss nahe, dass der Polymerbohrer die genannten Verfahren ideal ergänzt, zumal seine Anwendung den zusätzlichen Einsatz von Handinstrumenten er-

spart.

Für alle Gruppen konnte ferner das Eindringen des verwendeten Dentinadhäsivs (Clearfil SE) in die Dentintubuli nachgewiesen werden. Dies spricht dafür, dass eine anschließend eingebrachte Füllung auch am (infolge der Konditionierung) demineralisierten, weniger dichten Dentin haften sollte. Dies war sodann im Haftzugversuch nachzuweisen.

Hier wurden die Proben für jedes einzelne Verfahren – Exkavation mittels Hartmetallbohrer sowie drei selbstlimitierende Verfahren unter Einsatz des Polymerbohrers – in Gruppen unterteilt und zusätzlich eine Vergleichsgruppe “gesundes Dentin“ gebildet. Nach Applikation eines Dentinadhäsivs wurden die Proben einer Haftzugbelastung von durchschnittlich 21,05 MPa ausgesetzt. Der Versuch ergab keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen. Die Haftkraft von Kompositen wird also durch schonende, selbstlimitierende Verfahren nicht negativ beeinflusst – obgleich diese Verfahren mehr kariös verändertes und somit weniger kompaktes Dentin hinterlassen.

Dies auf Laborwerten basierenden Erkenntnisse aus dieser Studie sollten Forscher wie auch Behandler zum Umdenken veranlassen. Insbesondere sind substanzerhaltende, selbstlimitierende Methoden neu zu bewerten: Gegenüber dem konservativen Vorgehen – Kariesdiagnostik mittels subjektiver Sondenprüfung sowie Exkavation mittels Hartmetallbohrer – bieten diese schonenden Verfahren den Vorteil, bei Erreichen erhaltungsfähiger Dentinanteile selbsttätig zu stoppen und somit Gewebe zu erhalten. Wie die Studie belegt, bietet weiches, remineralisierbares Dentin gleichwertige Bedingungen für die anschließende Einbringung einer Füllung; die Härte des Dentins kann also nicht mehr als zentrales Kriterium für Kariesfreiheit gelten.

Die Erhaltung von Zahnschubstanz kann Patienten in vielen Fällen langwierige und schmerzhaft e Wurzelbehandlungen ersparen. Selbstlimitierende Methoden tragen erheblich dazu bei und ermöglichen die sichere Versorgung des befallenen Zahns. Sie bieten somit eine reelle Alternative zum konventionellen Vorgehen. Angesichts der wissenschaftlich belegten Vorteile solle sich die Zahnmedizin diesen modernen Therapien öffnen.



Ethikkommission · Pettenkoferstr. 8 · 80336 München

Herrn
Prof. Dr. K. H. Kunzelmann
Poliklinik f. Zahnerhaltung
Goethestr. 70
80336 München

Vorsitzender:
Prof. Dr. W. Eisenmenger
Telefon+49 (0)89 5160 - 5191
Telefax+49 (0)89 5160 - 5192
Ethikkommission@
med.uni-muenchen.de

www.ethikkommission.med.uni-muenchen.de

Postanschrift:
Pettenkoferstr. 8a
D-80336 München

Hausanschrift:
Pettenkoferstr. 8
D-80336 München
München, 15.06.2012 Hb-/sc

Unbedenklichkeitserklärung

1. Substanzschonende Kariesentfernung nach der FACE- Methode
2. Substanzschonende Kariesentfernung mit Hilfe eines Polymerbohrers
3. Remineralisation und Aufhellung von Zahnschmelz mit Hydroxylapatit-Suspensionen
4. Haftverbund zur Zahnhartsubstanz von selbstadhäsiven Füllungswerkstoffen
5. Aufbereitung und Abfüllen von Wurzelkanälen mit maschinell angetriebenen Wurzelkanalinstrumenten

Sehr geehrter Herr Prof. Kunzelmann,

haben Sie besten Dank für Ihr Schreiben (Eingang 13.06.2012), mit dem Sie bezüglich der Beratungsnotwendigkeit der o.g. Forschungsvorhaben nachfragen.

Sofern Sie Ihre Untersuchungen nur an Zähnen durchführen, die aus der Routinebehandlung aus Zahnarztpraxen übernommen werden, bestehen keine ethisch- rechtlichen Bedenken gegen dieses Projekt. Das von Ihnen verwendete Material ist nicht personenbezogen, d. h. dass eine Rückverfolgung zu den Spendern nicht möglich ist. Untersuchungen am Menschen sind in Ihrem Labor nicht vorgesehen.

Vorsorglich möchte ich darauf hinweisen, dass auch bei einer positiven Beurteilung Ihres Vorhabens die ärztliche und juristische Verantwortung für die Verantwortung des Projektes uneingeschränkt bei Ihnen und Ihren Mitarbeitern verbleibt.

Für Ihre Untersuchungen wünsche ich Ihnen viel Erfolg.

Mit freundlichen Grüßen


Prof. Dr. W. Eisenmenger
Vorsitzender der Ethikkommission

Mitglieder der Kommission:

Prof. Dr. W. Eisenmenger (Vorsitzender), Prof. Dr. G. Paumgartner (stellv. Vorsitzender), Prof. Dr. E. Held (stellv. Vorsitzender), PD Dr. Th. Beinert, Prof. Dr. H. U. Gallwas, Prof. Dr. D. Kunze, Dr. V. Mönch, Prof. Dr. H. H. Müller, Prof. Dr. R. Penning, Prof. Dr. K. Hahn, Prof. Dr. K. Pfeifer, Dr. Ch. Zach

Abbildung 7.1: Unbedenklichkeitserklärung der Ethikkommission; GZ: Hb/sc

Eidesstattliche Versicherung

Wellisch, Lidija

Name, Vorname

Ich erkläre hiermit an Eides statt,
dass ich die vorliegende Dissertation mit dem Thema

selbständig verfasst, mich außer der angegebenen keiner weiteren Hilfsmittel bedient und alle Erkenntnisse, die aus dem Schrifttum ganz oder annähernd übernommen sind, als solche kenntlich gemacht und nach ihrer Herkunft unter Bezeichnung der Fundstelle einzeln nachgewiesen habe.

Ich erkläre des Weiteren, dass die hier vorgelegte Dissertation nicht in gleicher oder in ähnlicher Form bei einer anderen Stelle zur Erlangung eines akademischen Grades eingereicht wurde.

München, 22.11.17

Ort, Datum

Unterschrift Doktorandin/Doktorand

Abbildung 7.2: Eidesstattliche Versicherung

Literaturverzeichnis

- Ahmed, A. A. R., García-Godoy, F., and Kunzelmann, K.-H. (2008). Self-limiting caries therapy with proteolytic agents. *Am J Dent*, 21(5):303–312.
- Allen, K. L., Salgado, T. L., Janal, M. N., and Thompson, V. P. (2005). Removing carious dentin using a polymer instrument without anesthesia versus a carbide bur with anesthesia. *J Am Dent Assoc*, 136(5):643–651.
- Alves, L. S., Fontanella, V., Damo, A. C., Ferreira de Oliveira, E., and Maltz, M. (2010). Qualitative and quantitative radiographic assessment of sealed carious dentin: a 10-year prospective study. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*, 109(1):135–141.
- Ammari, M. M., Moliterno, L. F. M., Hirata JÃºnior, R., SÃ¡llos, M. C., Soviero, V. M., and Coutinho Filho, W. P. (2014). Efficacy of chemomechanical caries removal in reducing cariogenic microbiota: a randomized clinical trial. *Brazilian oral research*, 28.
- Angmar, B., CARLSTROM, D., and GLAS, J. E. (1963). Studies on the ultrastructure of dental enamel. iv. the mineralization of normal human enamel. *J Ultrastruct Res*, 8:12–23.
- Balciuniene, I., Sabalaite, R., and Juskiene, I. (2005). Chemomechanical caries removal for children. *Stomatologija*, 7(2):40–44.
- Banerjee, A., Kidd, E. A., and Watson, T. F. (2000). In vitro evaluation of five alternative methods of carious dentine excavation. *Caries Res*, 34(2):144–150.

- Beeley, J. A., Yip, H. K., and Stevenson, A. G. (2001). [chemo-mechanical caries removal: a review of the techniques and latest developments]. *Ned Tijdschr Tandheelkd*, 108(7):277–281.
- Bergmann, J., Leitão, J., Kultje, C., Bergmann, D., and Clode, M. J. (2005). Removing dentine caries in deciduous teeth with carisolv: a randomised, controlled, prospective study with six-month follow-up, comparing chemomechanical treatment with drilling. *Oral Health Prev Dent*, 3(2):105–111.
- Bertassoni, Habelitz, M. (2011). Mechanical recovery of dentin following remineralization in vitro - an indentation study. *Journal of biomechanics*, 44:176–181.
- Bjørndal, L., Reit, C., Bruun, G., Markvart, M., Kjaeldgaard, M., Näsman, P., Thordrup, M., Dige, I., Nyvad, B., Fransson, H., Lager, A., Ericson, D., Petersson, K., Olsson, J., Santimano, E. M., Wennström, A., Winkel, P., and Gluud, C. (2010). Treatment of deep caries lesions in adults: randomized clinical trials comparing stepwise vs. direct complete excavation, and direct pulp capping vs. partial pulpotomy. *Eur J Oral Sci*, 118(3):290–297.
- Bohari, M. R., Chunawalla, Y. K., and Ahmed, B. M. N. (2012). Clinical evaluation of caries removal in primary teeth using conventional, chemomechanical and laser technique: an in vivo study. *J Contemp Dent Pract*, 13(1):40–47.
- Boston, D. W. (2003). New device for selective dentin caries removal. *Quintessence international (Berlin, Germany : 1985)*, 34:678–685.
- Bulut, Zekioglu, O., Eronat, C., and Bulut, H. (2004). Effect of carisolv on the human dental pulp: a histological study. *J Dent*, 32(4):309–314.
- Burrow, M. F., Bokas, J., Tanumiharja, M., and Tyas, M. J. (2003). Micro-tensile bond strengths to caries-affected dentine treated with carisolv. *Aust Dent J*, 48(2):110–114.
- Bussadori, S. K., Castro, L. C., and Galvão, A. C. (2005). Papain gel:

- a new chemo-mechanical caries removal agent. *J Clin Pediatr Dent*, 30(2):115–119.
- Bussadori, S. K., Godoy, C. H. L. d., Alfaya, T. A., Fernandes, K. P. S., Mesquita-Ferrari, R. A., and Motta, L. J. (2014). Chemo-mechanical caries removal with papacarieâ€: case series with 84 reports and 12 months of follow-up. *The journal of contemporary dental practice*, 15:250–253.
- Bussadori, S. K., Guedes, C. C., Bachiega, J. C., Santis, T. O., and Motta, L. J. (2011). Clinical and radiographic study of chemical-mechanical removal of caries using papac rie: 24-month follow up. *J Clin Pediatr Dent*, 35(3):251–254.
- Carrillo, C. M., Tanaka, M. H., Cesar, M. F., Camargo, M. A. F., Juliano, Y., and Novo, N. F. (2008). Use of papain gel in disabled patients. *Journal of dentistry for children (Chicago, Ill.)*, 75:222–228.
- Casagrande, L., Falster, C. A., Di Hipolito, V., De G es, M. F., Straffon, L. H., N r, J. E., and de Araujo, F. B. (2009). Effect of adhesive restorations over incomplete dentin caries removal: 5-year follow-up study in primary teeth. *J Dent Child (Chic)*, 76(2):117–122.
- Celiberti, P., Francescut, P., and Lussi, A. (2006). Performance of four dentine excavation methods in deciduous teeth. *Caries Res*, 40(2):117–123.
- Chiang, Y.-C., R sch, P., Dabanoglu, A., Lin, C.-P., Hickel, R., and Kunzelmann, K.-H. (2010). Polymerization composite shrinkage evaluation with 3d deformation analysis from microct images. *Dental materials : official publication of the Academy of Dental Materials*, 26:223–231.
- Clementino-Luedemann, T. N. R., Dabanoglu, A., Ilie, N., Hickel, R., and Kunzelmann, K.-H. (2006). Micro-computed tomographic evaluation of a new enzyme solution for caries removal in deciduous teeth. *Dent Mater J*, 25(4):675–683.
- Craig, R. G., GEHRING, P. E., and PEYTON, F. A. (1959). Relation

- of structure to the microhardness of human dentin. *J Dent Res*, 38(3):624–630.
- Dammaschke, T.; Dähne, L. K. M. S. U. O. K. (2001). Effektivität von Carisolv im Vergleich zu konventionellen Methoden zur Entfernung kariösen Dentins.
- Dammaschke, Rodenberg T, S. E. O. K. (2005). Vergleich der Effektivität von Smartprep mit herkömmlichen Rosenbohrern bei der Exkavation der Dentinkaries. *Deutsche Zahnärztliche Zeitschrift* 60 : 203-6.
- Dammaschke, T., Rodenberg, T. N., Schäfer, E., and Ott, K. H. R. (2006a). Efficiency of the polymer bur smartprep compared with conventional tungsten carbide bud bur in dentin caries excavation. *Oper Dent*, 31(2):256–260.
- Dammaschke, T., Stratmann, U., Danesh, G., Schäfer, E., and Ott, K. H. R. (2006b). Reaction of rat pulp tissue to carisolv 'new gel'—a histocytological evaluation. *Aust Dent J*, 51(1):57–63.
- Dammaschke, T., Stratmann, U., Mokrys, K., Kaup, M., and Ott, K. H. (2001). Histocytological evaluation of the reaction of rat pulp tissue to carisolv. *J Dent*, 29(4):283–290.
- Dammaschke, T., Vesnic, A., and Schafer, E. (2008). In vitro comparison of ceramic burs and conventional tungsten carbide bud burs in dentin caries excavation. *Quintessence Int*, 39(6):495–499.
- Dipsche, P. (2009). Chemo-/ Biomechanische Kariesentfernung mit Biosolv. *Dissertation, Ludwig-Maximilians-Universität München*.
- Dougherty, R. P. and Kunzelmann, K.-H. (2007). Computing local thickness of 3d structures with imagej. *Microsc Microanal* 13(Suppl 2), 2007.
- Efflandt, S. E., Magne, P., Douglas, W. H., and Francis, L. F. (2002). Interaction between bioactive glasses and human dentin. *J Mater Sci Mater Med*, 13(6):557–565.
- Ericson, D., Zimmerman, M., Raber, H., Götrick, B., Bornstein, R., and Thorell, J. (1999). Clinical evaluation of efficacy and safety of a new

- method for chemo-mechanical removal of caries. a multi-centre study. *Caries Res*, 33(3):171–177.
- Flückiger, L., Waltimo, T., Stich, H., and Lussi, A. (2005). Comparison of chemomechanical caries removal using carisolv or conventional hand excavation in deciduous teeth in vitro. *J Dent*, 33(2):87–90.
- Fusayama, T. (1979). Two layers of carious dentin; diagnosis and treatment. *Oper Dent*, 4(2):63–70.
- Fusayama, T. (1982). [new era in operative dentistry–comprehensive study on structure and removal of carious dentin]. *Kokubyo Gakkai Zasshi*, 49(1):1–17.
- Fusayama, T. (1997). The process and results of revolution in dental caries treatment. *Int Dent J*, 47(3):157–166.
- Fusayama, T., Okuse, K., and Hosoda, H. (1966). Relationship between hardness, discoloration, and microbial invasion in carious dentin. *J Dent Res*, 45(4):1033–1046.
- Goyal, P. A., Kumari, R., Kannan, V. P., and Madhu, S. (2015). Efficacy and tolerance of papain gel with conventional drilling method: a clinico-microbiological study. *The Journal of clinical pediatric dentistry*, 39:109–112.
- Gupta, S., Singh, C., Yeluri, R., Chaudhry, K., and Munshi, A. K. (2013). Clinical and microbiological evaluation of the carious dentin before and after application of papacarie gel. *The Journal of clinical pediatric dentistry*, 38:133–138.
- Hahn, P. and Hellwig, E. (2004). An in vitro investigation of penetration depth of dentine bonding agents into carious dentine. *J Oral Rehabil*, 31(11):1053–1060.
- Hamama, H. H., Yiu, C. K., and Burrow, Michael F, K. (2013). Chemical, morphological and microhardness changes of dentine after chemomechanical caries removal. *Aust Dent J* 2013, 58(3):283–92.
- Hamama, H. H., Yiu, C. K., and Burrow, M. F. (2014). Viability of in-

- tratubular bacteria after chemomechanical caries removal. *J Endod*, 40(12):1972–1976.
- Heidemann, D. (2001). *Endodontie*. Elsevier GmbH, Urban & Fischer Verlag.
- Hellwig (1999). *Einführung in die Zahnerhaltung*. Urban & Fischer.
- Hellwig, L. (2005). *Zahnärztliche Propädeutik*. Elsevier GmbH, Urban & Fischer Verlag.
- Imazato, S., Walls, A. W. G., Kuramoto, A., and Ebisu, S. (2002). Penetration of an antibacterial dentine-bonding system into demineralized human root dentine in vitro. *Eur J Oral Sci*, 110(2):168–174.
- IMC-Wiki (2016). Kariesdiagnostik.
- Isik, E. E., Olmez, A., Akca, G., and Sultan, N. (2010). A microbiological assessment of polymer and conventional carbide burs in caries removal. *Pediatr Dent*, 32(4):316–323.
- Kidd, E. A. M. (2004). How 'clean' must a cavity be before restoration? *Caries Res*, 38(3):305–313.
- Klasnic, J. (2010). *Verschleiß von Diamantschleifkörpern auf Zirkondioxidkeramik*. Dissertation, Universität Hamburg.
- Kneist (2004). Zur Infektionsquelle der Karies. *Quintessenz* 55, pages 237–246.
- Kotb, R. M. S., Abdella, A. A., Kateb, M. A. E., and Ahmed, A. M. (2009). Clinical evaluation of papacarie in primary teeth. *J Clin Pediatr Dent*, 34(2):117–123.
- Krause, F., Braun, A., Eberhard, J., and Jepsen, S. (2007). Laser fluorescence measurements compared to electrical resistance of residual dentine in excavated cavities in vivo. *Caries Res*, 41(2):135–140.
- Kunzelmann, J. H. K. (2011). Neue Erkenntnisse und selbstlimitierende Methoden. *zm 101, Nr. 13 A, 1.7.2011, (1860)*.

- Kunzelmann, K.-H. (2005). Neue Erkenntnisse und selbstlimitierende Methoden. *ZM, Heft 13/2011 Zahnmedizin*.
- Lai, G., Kaisarly, D., Xu, X., and Kunzelmann, K.-H. (2014). Microct-based comparison between fluorescence-aided caries excavation and conventional excavation. *Am J Dent*, 27(1):12–16.
- Lennon, A. M., Attin, T., Martens, S., and Buchalla, W. (2009). Fluorescence-aided caries excavation (face), caries detector, and conventional caries excavation in primary teeth. *Pediatr Dent*, 31(4):316–319.
- Lennon, A. M., Buchalla, W., Switalski, L., and Stookey, G. K. (2002). Residual caries detection using visible fluorescence. *Caries Res*, 36(5):315–319.
- Lima, G. Q. T., Oliveira, E. G., Souza, J. I. L. d., and Monteiro Neto, V. (2005). Comparison of the efficacy of chemomechanical and mechanical methods of caries removal in the reduction of streptococcus mutans and lactobacillus spp in carious dentine of primary teeth. *J Appl Oral Sci*, 13(4):399–405.
- Lula, E. C. O., Monteiro-Neto, V., Alves, C. M. C., and Ribeiro, C. C. C. (2009). Microbiological analysis after complete or partial removal of carious dentin in primary teeth: a randomized clinical trial. *Caries Res*, 43(5):354–358.
- Maragakis, G. M., Hahn, P., and Hellwig, E. (2001). Clinical evaluation of chemomechanical caries removal in primary molars and its acceptance by patients. *Caries Res*, 35(3):205–210.
- McInnes-Ledoux, P., Ledoux, W. R., and Weinberg, R. (1987). Bond strength of dentinal bonding agents to chemomechanically prepared dentin. *Dent Mater*, 3(6):331–336.
- Meredith, N., Sherriff, M., Setchell, D. J., and Swanson, S. A. (1996). Measurement of the microhardness and young's modulus of human enamel and dentine using an indentation technique. *Arch Oral Biol*, 41(6):539–545.

- Mertz-Fairhurst, E. J., Curtis, J. W., Ergle, J. W., Rueggeberg, F. A., and Adair, S. M. (1998). Ultraconservative and cariostatic sealed restorations: results at year 10. *J Am Dent Assoc*, 129(1):55–66.
- Neves, A. D. A., Coutinho, E., Cardoso, M. V., de Munck, J., and Van Meerbeek, B. (2011a). Micro-tensile bond strength and interfacial characterization of an adhesive bonded to dentin prepared by contemporary caries-excitation techniques. *Dent Mater*, 27(6):552–562.
- Neves, A. D. A., Coutinho, E., Munck, J. D., and Meerbeek, B. V. (2011b). Caries-removal effectiveness and minimal-invasiveness potential of caries-excitation techniques: a micro-ct investigation. *J Dent*, 39(2):154–162.
- Ogawa, K., Yamashita, Y., Ichijo, T., and Fusayama, T. (1983). The ultrastructure and hardness of the transparent layer of human carious dentin. *J Dent Res*, 62(1):7–10.
- Ohgushi (1973). Collagen fibers in the two layers of carious dentin. *Article in Japanese*, pages 40, 65–74. Struktur des kariösen erhaltungswürdigen und nicht -erhaltungswürdigen Dentins.
- Pashley, D. H., Ciucchi, B., Sano, H., Carvalho, R. M., and Russell, C. M. (1995). Bond strength versus dentine structure: a modelling approach. *Arch Oral Biol*, 40(12):1109–1118.
- Peric, T., Markovic, D., and Petrovic, B. (2009). Clinical evaluation of a chemomechanical method for caries removal in children and adolescents. *Acta Odontol Scand*, pages 1–7.
- Peters, M. C., Bresciani, E., Barata, T. J. E., Fagundes, T. C., Navarro, R. L., Navarro, M. F. L., and Dickens, S. H. (2010). In vivo dentin remineralization by calcium-phosphate cement. *J Dent Res*, 89(3):286–291.
- Phrukkanon, S., Burrow, M. F., and Tyas, M. J. (1998). Effect of cross-sectional surface area on bond strengths between resin and dentin. *Dent Mater*, 14(2):120–128.
- Prabhakar, A. and Kiran, N. K. (2009). Clinical evaluation of polyami-

- de polymer burs for selective carious dentin removal. *J Contemp Dent Pract*, 10(4):26–34.
- Rack, A. (2007). Zerstörungsfreie Einblicke in kleinste Strukturen Synchrotron-Mikrotomographie. *GIT Labor-Fachzeitschrift*, pages 35–37.
- Radlanski, R. J. (2011). *Curriculum Orale Struktur- und Entwicklungsbiologie*. Quintessenz Verlag.
- Ricketts, D. N. J., Kidd, E. A. M., Innes, N., and Clarkson, J. (2006). Complete or ultraconservative removal of decayed tissue in unfilled teeth. *Cochrane Database Syst Rev*, (3):CD003808.
- Sano, H., Shono, T., Sonoda, H., Takatsu, T., Ciucchi, B., Carvalho, R., and Pashley, D. H. (1994). Relationship between surface area for adhesion and tensile bond strength—evaluation of a micro-tensile bond test. *Dent Mater*, 10(4):236–240.
- Schmidlin, P. R., Zehnder, M., Göhring, T. N., and Waltimo, T. M. (2004). Glutaraldehyde in bonding systems disinfects dentin in vitro. *J Adhes Dent*, 6(1):61–64.
- Schwendicke, F., Paris, S., and Tu, Y.-K. (2015). Effects of using different criteria for caries removal: A systematic review and network meta-analysis. *J Dent*, 43(1):1–15.
- Silva, N. R. F. A., Carvalho, R. M., Pegoraro, L. F., Tay, F. R., and Thompson, V. P. (2006). Evaluation of a self-limiting concept in dentinal caries removal. *J Dent Res*, 85(3):282–286.
- Splieth, C. (2004). *Noninvasive Karies- und minimalinvasive Füllungstherapie*. Spitta Verlag.
- Tao, Y.-C. and Fried, D. (2009). Near-infrared image-guided laser ablation of dental decay. *J Biomed Opt*, 14(5):054045.
- Tsolmon (2008). Charakterisierung von Dentinoberflächen nach Bearbeitung mit neuen, minimal-invasiven und selbstlimitierenden Präparationsverfahren. *Dissertation, Ludwig-Maximilians-Universität München*.

Wikipedia/Haerte (2016).

Willmott, N. S., Wong, F. S. L., and Davis, G. R. (2007). An x-ray microtomography study on the mineral concentration of carious dentine removed during cavity preparation in deciduous molars. *Caries Res*, 41(2):129–134.

Yoshiyama, M., Tay, F. R., Doi, J., Nishitani, Y., Yamada, T., Itou, K., Carvalho, R. M., Nakajima, M., and Pashley, D. H. (2002). Bonding of self-etch and total-etch adhesives to carious dentin. *J Dent Res*, 81(8):556–560.

Zander, H. A. and Hürzeler, B. (1958). Continuous cementum apposition. *J Dent Res*, 37(6):1035–1044.

Zinck, J. H., McInnes-Ledoux, P., Capdeboscq, C., and Weinberg, R. (1988). Chemomechanical caries removal—a clinical evaluation. *J Oral Rehabil*, 15(1):23–33.

Kapitel 8

Anhang

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|-----|--|----|
| 4.1 | <i>PolyBur P1 und Hartmetall-Rosenbohrer (Gebr. Brasseler, Komet)</i> | 23 |
| 4.2 | <i>Biosolv 3</i> | 24 |
| 4.3 | <i>Carisolv</i> | 25 |
| 4.4 | <i>Lagerschlitten - Bohrsystem nach Konstruktionsvorgaben von Prof. Dr. Kunzelmann (Konstruktion: Fa. Syndicad)</i> | 27 |
| 4.5 | <i>A: ganzer Zahn mit Karies, B: Zahn wird in 2 mm dicke Scheiben geschnitten, C: modifizierter MicroCT Halter mit Probe (2 mm dick)</i> | 31 |
| 4.6 | <i>Versuchsdurchführung</i> | 31 |
| 4.7 | <i>Eine Übersichtsaufnahme einer Probe im Rasterelektronenmikroskop, weiße Pfeile: Kavität, gelbes Rechteck: an der Bruchstelle wird die Kavität und die längs angeschnittenen Dentinkanälchen dargestellt</i> | 34 |
| 5.1 | <i>Eindringtiefen mit den unterschiedlichen Exkavationsmethoden.</i> | 38 |
| 5.2 | <i>3D-Darstellung des Exkavationsendpunktes der einzelnen Therapien. Rot: Substanzabtrag mit der selbstlimitierenden Methode; rot + grün: Substanzabtrag bei Exkavation mit dem Hartmetallbohrer; grün: Substanz, die mit den selbstlimitierenden Methoden erhalten werden kann</i> | 40 |
| 5.3 | <i>3D-Darstellung des Exkavationsendpunktes: Vergleich zwischen selbstlimitierenden Methoden und Hartmetallbohrer. Grün: Volumen der Zahnschubstanz, die mit dem Hartmetallbohrer zusätzlich zur selbstlimitierenden Methode entfernt wird</i> | 41 |
| 5.4 | <i>3D-Darstellung: Differenz im Substanzabtrag mit Polymer- und Hartmetallbohrer; farbiger Bereich kodiert die mittlere Dicke (local thickness) in 3D. Gelb: Differenz des Abtrags zwischen PolyBur und Hartmetallbohrer; schwarz (zentral): Pulpa. Histogramm: Verteilung der mittleren Dicke (local thickness); rot: Mittelwert und Standardabweichung</i> | 42 |

| | | |
|------|--|----|
| 5.5 | Vergleich des Substanzerhalts in den drei Gruppen – selbstlimitierende Verfahren versus Hartmetallbohrer | 43 |
| 5.6 | Vergleich zwischen Hartmetallbohrer und selbstlimitierenden Verfahren | 44 |
| 5.7 | Dentinoberfläche mit Schmierschicht nach Exkavation mit dem Hartmetall-Rosenbohrer (3000fach vergrößert) | 46 |
| 5.8 | Dentinoberfläche nach Exkavation mit dem Hartmetall-Rosenbohrer (5000fach vergrößert). Gelber Pfeil: Bruchstelle; schwarzer Pfeil: Bakterien in der Schmierschicht auf der Dentinoberfläche; roter Pfeil: Abrieb des Bohrers; blauer Pfeil: trotz Schmierschicht sichtbare Dentintubulus-Öffnung | 47 |
| 5.9 | Dentinoberfläche nach Exkavation mit dem Polymerbohrer (12.000fach vergrößert). Grüner Pfeil: teilkolludierte Dentintubuli; schwarzer Pfeil: Bakterien; roter Pfeil: Abrieb des Bohrers | 48 |
| 5.10 | Schmierschicht und Bruchstelle mit Smear Plugs in den Dentintubuli nach Exkavation mit dem Polymerbohrer (30.000 fache Vergrößerung). Grüne Pfeile: Dentintubuli längs eröffnet; weißer Pfeil: intertubuläres Dentin; blauer Pfeil: Dentin ohne sichtbare Poren | 48 |
| 5.11 | Oben: Mit dem Polymerbohrer exkavierte Dentinkavität (1.000fach vergrößert). Unten: Mit dem Hartmetallbohrer exkavierte Dentinkavität (7500fach vergrößert). | 49 |
| 5.12 | Dentinoberfläche nach Exkavation mit dem PolyBur und Biosolv bei 5000facher Vergrößerung: Die Dentintubuli sind frei von Schmierschicht und Smear Plugs | 50 |
| 5.13 | Dentintubuli nach Exkavation mit Polymerbohrer und Biosolv (30.000fach vergrößert). Weiße Markierung: peritubuläres Dentin; rote Markierung: intertubuläres Dentin; grüner Pfeil: deutlich sichtbare Kollagenfasern; gelber Pfeil: einige Bakterien | 51 |
| 5.14 | Kavität und Bruchstelle nach Exkavation mit Polymerbohrer und Biosolv (15.000fach vergrößert). Weiße Pfeile: Schräg gebrochene Tubuli mit Smear Plugs | 51 |
| 5.15 | Kavität nach Exkavation mit Polymerbohrer und Carisolv (12.000fach vergrößert). Blaue Pfeile: Reste von Smear Plugs; gelber Pfeil: Bakterien | 52 |
| 5.16 | Kavität und Bruchstelle nach Exkavation mit Polymerbohrer und Carisolv (10.000fach vergrößert). Blaue Pfeile: Smear Plugs | 53 |

| | | |
|------|---|----|
| 5.17 | Kavität nach Exkavation mit Polymerbohrer und Carisolv (30.000fach vergrößert). Weder eine Oberflächenstruktur noch Bakterien sind erkennbar. | 53 |
| 5.18 | Oben: Kavität nach Exkavation mit Polymerbohrer und Carisolv; unten: Kavität nach Exkavation mit Polymerbohrer und Biosolv (jeweils 30.000fach vergrößert) | 54 |
| 5.19 | Kavität nach Exkavation mit dem Polymerbohrer und Infiltration mit Clearfil SE (1.000fach vergrößert): Es sind drei verschiedene Oberflächenstrukturen sichtbar. Schwarzer Pfeil: exkavierte Oberfläche der Kavität mit Dentinadhäsiv; gelber Pfeil: verdichtete Schmierschicht; blauer Pfeil: Bruchfläche | 55 |
| 5.20 | Kavität nach Exkavation mit dem Polymerbohrer und Carisolv sowie Infiltration mit Clearfil SE (1.000fach vergrößert). A: die exkavierte Oberfläche der Kavität, die deutlich das Dentinadhäsiv erkennen lässt. B: vermutlich durch die mechanische Belastung beim Bruch deformiertes Material (Zahn oder Dentinadhäsiv). | 56 |
| 5.21 | Kavität, exkaviert mit dem Polymerbohrer und Carisolv und behandelt mit Clearfil SE (20.000fache Vergrößerung). Schwarzer Pfeil: Oberflächenstruktur der Kavität mit Dentinadhäsiv; roter Pfeil: Kunststoff-Tag | 56 |
| 5.22 | Kavität nach Exkavation mit dem Polymerbohrer und Biosolv sowie Infiltration mit dem DBA Clearfil SE infiltriert bei (1000fache) Vergrößerung. Oben: Oberfläche der Kavität mit Dentinadhäsiv; Mitte: Schmierschicht; Eindringtiefe von ca. 10 μ m (zwischen den beiden Linien); unten: Mit Adhäsiv infiltrierte Dentintubuli | 57 |
| 6.1 | Endpunkt des Bohrers: der Schaft hat Kontakt zur Probe | 62 |
| 7.1 | Unbedenklichkeitserklärung der Ethikkommission; GZ: Hb/sc | 77 |
| 7.2 | Eidesstattliche Versicherung | 78 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|-----|---|----|
| 4.1 | <i>Lagerschlittenversuch – Gruppeneinteilung</i> | 28 |
| 5.1 | <i>Tabelle Durchschnittliche Eindringtiefen der drei minimal-invasiven Verfahren im Vergleich zum herkömmlichen Verfahren (Angaben in mm; $p < 0,05$)</i> | 38 |
| 5.2 | <i>Vergleich des Substanzerhalts – selbstlimitierende Exkavationsverfahren versus Exkavation mittels Hartmetallbohrer (Angaben in μm; $p < 0,05$ (One-Way – Test))</i> | 43 |
| 5.3 | <i>Mineraldichte laut Grauwertauswertung [in g/cm^3]</i> | 45 |
| 5.4 | <i>SPSS-Auswertung der Haftfestigkeit (Post-hoc Test/Tukey-B): $p > 0,05$. Es zeigt sich ein statistisch signifikanter Unterschied zwischen selbstlimitierenden Methoden und Hartmetallbohrer</i> | 58 |
| 5.5 | <i>SPSS-Auswertung (Post-hoc Test / Tukey-B); Angaben in MPa. Es zeigt sich ein signifikanter Unterschied zwischen selbstlimitierenden Methoden und Hartmetallbohrer bzgl. Eindringtiefe in die Dentinkaries.</i> | 59 |

Kapitel 9

Danksagung

Herzlichen Dank an alle, die mich bei meiner Dissertation und während dieser Zeit unterstützt haben.

Besonders danken möchte ich Prof. Dr. Karl-Heinz Kunzelmann, der mich bei meinem Dissertationsthema betreut hat und jederzeit bereit war, fachliche Themen zu diskutieren, sowie meine Arbeit mit wertvollen Hilfestellungen und weitergehenden Anregungen zu unterstützen.